



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación



EVALUACIÓN DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y EFICIENCIA DRENANTE EN CAPAS GRANULARES PARA PAVIMENTOS ARTICULADOS PERMEABLES

Emily Nataly Ariza Garzón – 507429

Orlando Velandia Riscanevo – 507135

Proyecto presentado para optar al título de Ingeniero Civil, en modalidad trabajo de
investigación

Dirigido por:

Ingeniero Msc Cristhian Alexander Rosales Rodríguez

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.

2021



Fuente: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

Nota de aceptación

Firma Presidente de Jurado

Firma de Jurado

Firma de Jurado

Bogotá, junio 4 de 2021



AGRADECIMIENTOS

Infinitas Gracias a Nuestro Señor Todopoderoso por la oportunidad que nos brinda de compartir todo el conocimiento que nos ofrece la Institución. Por darnos la oportunidad, paciencia y fortaleza para alcanzar el objetivo, al igual que para no ceder ante las adversidades y dificultades que rodean el proceso formativo. Ahora nuestro deber llevar con orgullo la bandera del compromiso y mostrar cuan valioso es nuestro trabajo para la sociedad.

Es gratificante saber del incondicional y oportuno apoyo que nos brinda la Universidad, y que nos llena de confianza y motivación para aventurarnos en esta experiencia sin igual, que además de, formarnos como profesionales íntegros, también se instruye a la persona en valores y ética profesional, lo cual nos deja en plena disposición de servir a la comunidad con los conocimientos adquiridos, haciendo del ingeniero una persona idónea en la toma de decisiones encaminadas a la resolución de situaciones presentadas en campo.

Es el incondicional apoyo que nos brindan los compañeros de formación, quienes lograron con su ánimo, dedicación y empeño hacer más ameno el camino hacia el último peldaño, cuya motivación impulsada por un sentimiento de superación y crecimiento personal, logró fortalecer nuestra voluntad de continuar con nuestro proceso sin entregarnos al cansancio, descubriendo la mejor parte de nosotros por medio de sus actos, sus palabras correctas en el momento justo, su irreverencia en la toma de decisiones con la plena conciencia del objetivo trazado.

Es un gusto saber que ganamos el respeto y admiración de personas completamente valiosas e inteligentes, de compañeros egresados que confiaron en este proceso y dispusieron su voluntad a nuestros requerimientos académicos. A aquellos que brindaron su amistad sin condiciones y que aportaron incommensurables ideas, no solo en ámbito cognitivo, sino también personal.



Es preciso resaltar grandes propósitos y retos que debemos asumir ahora que nuestras decisiones cobran madurez y respeto en el campo de la Ingeniería, mostrando actitud y compromiso, sin poner en duda nuestra fortaleza, puesto que, se cuenta con todas las herramientas que se requieren para asumir retos en un mercado tan competitivo como el de la Ingeniería.



TABLA DE CONTENIDO

1. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL.....	12
2. INTRODUCCIÓN.....	13
3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	15
4. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	18
5. OBJETIVOS	23
5.1. Objetivo general	23
5.2. Objetivos específicos.....	23
6. ESTADO DEL ARTE	24
6.1. Antecedentes Históricos	24
7. MARCO TEÓRICO	38
7.1. Materiales Granulares	38
7.1.1. Base Granular	38
7.1.2. Subbase Granular	40
7.1.3. Subrasante	41
7.1.4. Conductividad Hidráulica en materiales granulares	41
7.1.5. Grado de compactación en capas granulares de pavimentos.....	43
7.1.6. Procesos de Captación de agua esorrentía	44
7.1.7. Pavimento Permeable	46
7.1.8. Diseño Estructural	49
7.1.9. Gestión de la esorrentía.....	50
7.1.10. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles	52
7.1.11. Software Soil Water Characteristics	54
8. MARCO CONCEPTUAL	56
8.1. Agregado Grueso	57
8.2. Concreto Poroso.....	58
8.3. Conductividad Hidráulica	58
8.4. Elementos Finitos	59
8.5. Energías De Compactación	59
8.6. Hidroplaneo	60
8.7. Permeabilidad.....	61
8.8. Slide	61



8.9.	Tasa De Infiltración.....	62
8.10.	Tiempo De Infiltración	62
9.	METODOLOGÍA.....	63
9.1.	Etapa 1	65
9.1.1.	Caracterización Física	65
9.1.1.1.	Granulometrías	66
	Subbase permeable.....	66
	Capa de colocación y material de juntas.....	67
9.1.1.2.	Clasificación de suelos.....	68
9.1.2.	Caracterización Hidráulica	69
9.1.3.	Clasificación de la permeabilidad del suelo según INVIAS	74
9.2.	Etapa 2.....	75
9.2.1.	Espesores de INTERPAVE (diseño).....	76
9.2.2.	Curvas IDF	77
9.2.3.	Slide (variables de entrada, datos de salida (resultados de entrega). Revisión de ecuaciones y variables en ecuaciones).....	78
9.3.	Etapa 3.....	78
10.	ALCANCE Y LIMITACIONES.....	80
11.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	81
11.1.	Resultados.....	81
11.1.1.	Caracterización Física.....	81
11.1.2.	Caracterización Hidráulica	87
11.1.3.	Modelación SLIDE	96
11.1.4.	Tiempo de infiltración	112
11.2.	Análisis	114
12.	CONCLUSIONES	121
13.	SUGERENCIAS	123
14.	ANEXOS.....	124
15.	BIBLIOGRAFÍA	125
16.	RELACIÓN DE FIRMAS	129



LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Áreas amenaza alta, media y baja por localidad	21
Tabla 2 Evolución del Pavimento Permeable	24
Tabla 3 Correspondencia entre clase de capas granulares, el tipo de pavimento y las características de tránsito	39
Tabla 4 Requisitos de los agregados para bases granulares	39
Tabla 5 Requisitos de los agregados para subbases granulares	40
Tabla 6 Coeficiente de Permeabilidad Cabeza Constante	43
Tabla 7 Coeficientes de Permeabilidad.....	43
Tabla 8 Gradaciones típicas requeridas para agradados de Sub-base	66
Tabla 9 Granulometrías típicas para bases permeables no estabilizadas	67
Tabla 10 Límites típicos de distribución de tamaño de partículas para material de capa de colocación.....	68
Tabla 11 Tabla de clasificación de suelos.....	69
Tabla 12 Definición de variables	71
Tabla 13 Relación aproximada entre la clasificación unificada y la permeabilidad	75
Tabla 14 Categorías de carga.....	77
Tabla 15 Granulometría # 1 para sub-base permeable no estabilizada	82
Tabla 16 Granulometría # 2 para sub-base permeable no estabilizada	83
Tabla 17 Granulometría # 3 para sub-base permeable no estabilizada	84
Tabla 18 Granulometría de capa colocación.....	85
Tabla 19 Material de junta adoquín.....	85
Tabla 20 Variables modificadas por la compactación	89
Tabla 21 Conductividad hidráulica saturada con y sin efectos de compactación	89
Tabla 22 Conductividad Hidráulica Modificada sub base #1	92
Tabla 23 Conductividad Hidráulica Modificada sub base #2	93
Tabla 24 Conductividad Hidráulica Modificada sub base #3	93
Tabla 25 Conductividad Hidráulica Modificada Capa de colocación	93
Tabla 26 Conductividad Hidráulica Modificada Juntas	93
Tabla 27 Tabla resumen conductividad hidráulica	94



Tabla 28 Caudales con Tubería Central	103
Tabla 29 Velocidad de descarga total (m/d).....	106
Tabla 30 Caudales - Tubería Lateral.....	109
Tabla 31 Velocidad de descarga total (m/d) - Tubería Lateral.....	111
Tabla 32 Tiempo de infiltración sub-base tipo 1 – 10 Minutos.....	112
Tabla 33 Tiempo de infiltración sub-base tipo 1 - 60 Minutos.....	112
Tabla 34 Tiempo de infiltración sub-base tipo 2 - 10 Minutos.....	113
Tabla 35 Tiempo de infiltración sub-base tipo 2 - 60 Minutos.....	113
Tabla 36 Tiempo de infiltración sub-base tipo 3 - 10 Minutos.....	113
Tabla 37 Tiempo de infiltración sub-base tipo 3 - 60 Minutos.....	113
Tabla 38 % Eficiencia Sub-base Tipo 1 – Duración 10 Minutos	114
Tabla 39 % Eficiencia Sub-base Tipo 1 – Duración 60 Minutos	115
Tabla 40 % Eficiencia Sub-base Tipo 2 – Duración 10 Minutos	115
Tabla 41 % Eficiencia Sub-base Tipo 2 – Duración 60 Minutos	115
Tabla 42 % Eficiencia Sub-base Tipo 3 – Duración 10 Minutos	116
Tabla 43 % Eficiencia Sub-base Tipo 3 – Duración 60 Minutos	116
Tabla 44 % Eficiencia Sub-base – 10 Minutos	116
Tabla 45 % Eficiencia Sub-base – 60 Minutos	117
Tabla 46 Resumen de resultados	121

LISTA DE IMÁGENES

Ilustración 1 Tipos de sistemas de pavimento permeables: Tipo A - infiltración total	50
Ilustración 2 Tipos de sistemas de pavimento permeables: Tipo B - infiltración parcial....	51
Ilustración 3 Tipos de sistemas de pavimento permeables: Tipo C - sin infiltración	52
Ilustración 4 Programa Soil Water Characteristics	55
Ilustración 5 Diseño de pavimento permeable en bloque de concreto.....	57
Ilustración 6 Sistema no infiltración.....	76
Ilustración 7 Espesores para categoría de carga 1	77
Ilustración 8 Modelo del pavimento.....	86



Ilustración 9 Tablero de resultados soil water characteristics.....	88
Ilustración 10 Grafica de conductividad hidráulica, humedad del suelo y potencial (Soil water characteristic)	88
Ilustración 11 Ejemplo de modelación en soil water characteristic	90
Ilustración 12 Modelación de Estructura de Pavimento.....	97
Ilustración 13 Modelo de Análisis Steady state groundwater	98
Ilustración 14 Valores de Conductividad Hidráulica en cada capa	98
Ilustración 15 Discretización de Elementos.....	98
Ilustración 16 Configuración de malla	98
Ilustración 17 Condiciones de borde	99
Ilustración 18 Sección de Descarga.....	99
Ilustración 19 Infiltración Vertical	100
Ilustración 20 Modelación Final.....	100
Ilustración 21 Presión de Poros	101
Ilustración 22 Modelación final Tubería Lateral.....	101
Ilustración 23 Presión de poros - Tubería Lateral.....	101
Ilustración 24 Velocidad de descarga	106
Ilustración 25 Velocidad de descarga - Tubería Lateral	111

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Ecuación Darcy	42
Ecuación 2 Coeficiente de Permeabilidad - Ensayo Cabeza Variable.....	42
Ecuación 3. 1500 kPa de humedad, %v	71
Ecuación 4. 1500 kPa de humedad, primera solución, %v.....	72
Ecuación 5. 33 kPa de humedad, densidad normal, %v	72
Ecuación 6. 33 kPa de humedad, primera solución, %v.....	72
Ecuación 7. 33 kPa de humedad de saturación, densidad normal, %v	72
Ecuación 8. 33 kPa de humedad de saturación, primera solución, %v	72
Ecuación 9. Humedad de saturación (0 kPa), densidad normal, %v	72
Ecuación 10. Densidad normal, g /cm.....	72



Ecuación 11. Densidad ajustada, g/cm^3	73
Ecuación 12. Humedad de saturación (0 kPa), densidad ajustada, %v.....	73
Ecuación 13. 33 kPa de humedad, densidad ajustada, %v.....	73
Ecuación 14. 33 kPa de humedad de saturación, densidad ajustada, %v.....	73
Ecuación 15. Coeficiente de humedad – tensión	73
Ecuación 16. Conductividad saturada (matriz de suelo), mm/h.....	73
Ecuación 17. Pendiente de la curva logarítmica tensión-humedad	74
Ecuación 18. Fracción de volumen de grava (decimal), g/cm^3	74
Ecuación 19. Densidad del suelo grueso, g/cm^3	74
Ecuación 20. Conductividad saturada (suelo grueso), mm	74
Ecuación 21 Ecuación Intensidad	95



1. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

Simulación de materiales: Relacionado con temas concernientes a la condición física y comportamental de materiales de construcción de acuerdo con las necesidades del servicio que, para este caso, se estudia las propiedades de infiltración de agua y drenaje de escorrentía que ejerza una acción de mantenimiento preventivo sobre la capa de rodadura, beneficiando la vida útil de esta.



2. INTRODUCCIÓN

La investigación realizada permite conocer e identificar la condiciones físicas e hidráulicas de las capas granulares empleadas para la construcción de los pavimentos permeables como herramienta de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).

La condición particular de este tipo de estructuras y las ventajas referentes a la mitigación del impacto ambiental, ofrecen una alternativa de solución a la problemática que surge de un drenaje deficiente de la escorrentía debido al incremento de áreas urbanísticas, que reducen la infiltración natural del terreno, generando a corto plazo, empozamientos recurrentes en la superficie que derivan en inundaciones.

La determinación de eficiencia drenante se fundamenta en los resultados obtenidos en el desarrollo de una simulación mediante el software SLIDE, que logra evaluar la diversidad del tamaño de partículas, condiciones de compactación y permeabilidad, y cuyo resultado, determina la velocidad y caudal de infiltración.

La modelación de las condiciones hidráulicas de la sub-base logrará evidenciar el comportamiento de la capa bajo la presencia de agua en inmediaciones de su estructura.

La condición de la capacidad hidráulica que presenta la capa de pavimento permitirá evaluar la eficiencia drenante de este, en función de la entrega de agua escorrentía presente en la capa de rodadura y el desarrollo de la infiltración a lo largo de la sub-base.

Los resultados que presenta la investigación y modelación proporcionan una idea de la constitución del material relacionado con su calidad en virtud de las características de compactación, porcentaje de material grueso, geometría de las partículas, entre otros.

Los resultados expuestos servirán para constituir recomendaciones técnicas de diseño, de acuerdo con los valores de precipitación presentes en un sitio determinado, haciendo énfasis en las características propias de este tipo de pavimentos y su campo de aplicación

en la Ingeniería Civil, dadas las necesidades de servicio y las particularidades respecto a los pavimentos convencionales.



3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Los criterios convencionales de diseño y construcción de pavimentos, constituidos por capas granulares, usualmente se refieren a la resistencia a cargas de servicio, el fácil acceso y a la eficiencia económica, sin considerar externalidades producidas por el impacto generado al medioambiente en el desarrollo de estos, como lo son la impermeabilización de zonas naturales, deforestación e inundaciones producidas por la escorrentía y la insuficiencia de drenaje.

Debido a la necesidad de urbanización, se incrementa el número de vías, zonas peatonales y zonas de aparcamiento que tienen como consecuencia la reducción de drenaje natural con la que contaba el área antes de ser intervenida, lo que genera, inundaciones y contaminación en cuerpos de agua. Según Javier & Gamboa, 2017 el agua en una vía es necesaria en el proceso constructivo, sin embargo, cuando se presenta en la etapa de servicio del pavimento esta tiende a generar problemas, por lo que se diseñan estructuras para la evacuación de las mismas como lo son cunetas, drenes y alcantarillas, entre otros.

Sin embargo, estas obras se hacen insuficientes para controlar la cantidad de agua de escorrentía y freática, causando así, daños en los granulares por entrada de agua a la capa de rodadura y, por otra parte, se generan daños por oxidación y presiones internas cuando el agua se infiltra a través de los granulares, produciendo daños en el comportamiento mecánico del concreto asfáltico e hidráulico, afectando el tránsito, causando erosión en la capa de rodadura evidenciado en depresiones y fallas funcionales comprometiendo la vida útil de la estructura.

Una de las problemáticas más latentes e importantes en la capital, es la amortiguación de las aguas lluvias presentes en el espacio público, llámese andén o vía de tránsito vehicular. La causa de esta novedad se presenta en la insuficiencia de drenaje superficial, el cual no supe el 100% del caudal producto de la precipitación. Al tener deficiencias en el drenaje

superficial, se presentan empozamientos o represamientos de agua que generan dificultades de transporte vehicular y peatonal. [2], [3]

Según Gutiérrez et al., 2016, la filtración del terreno natural (área boscosa), constituye un valor porcentual considerable al 90% del agua escorrentía. La restante, se alberga en los cuerpos de agua, fuentes y otros. En las áreas agrícolas, la reducción de filtración, respecto a la zona boscosa, presenta una disminución del 25%. A su vez las fuentes de agua resguardan un 30% de la escorrentía existente. En zonas de mediano asentamiento urbanístico, se evidencia un decrecimiento notable de la infiltración, permitiendo que este proceso se realice en tan solo un 30%. El restante 70%, permanece en los cuerpos de agua. Por último, en las áreas densamente pobladas, la infiltración es casi nula, tan solo un 5%. El 95% se encauza hacia los cuerpos de agua.

Los pavimentos con capas granulares permeables hacen parte del conjunto de las estrategias que se pueden implementar para atender los criterios de sustentabilidad ambiental en materia de construcción de obras civiles horizontales de infraestructura para el transporte peatonal y zonas de bajo tráfico vehicular, en particular los relacionados con la conservación, el aprovechamiento y manejo de las aguas de lluvia. [4]

Conforme a lo anterior, se hace necesario la construcción de pavimentos con capas granulares cuyas características técnicas, permitan el drenaje o infiltración proveniente de escorrentía superficial, con el objeto de mitigar la problemática mencionada, de acuerdo con la precipitación que se genere en la localización del proyecto constructivo, además de brindar una alternativa de recolección de aguas, para su futura reutilización y disposición en beneficio del sistema.

En ese orden de ideas, se considera el siguiente cuestionamiento, como punto de partida para esta investigación:



¿Cuál es la eficiencia de drenaje de capas granulares en un pavimento articulado a partir de mediciones de la conductividad hidráulica con variaciones del grado de compactación, tamaño y distribución de las partículas?

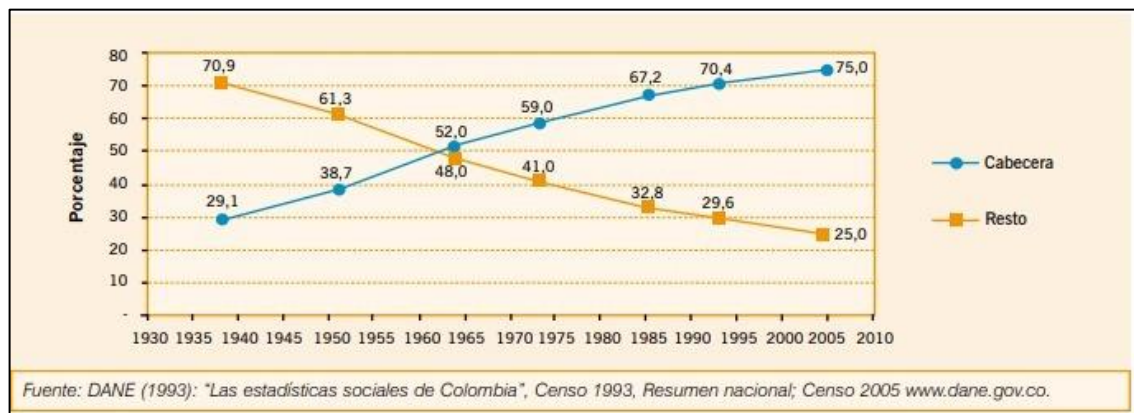


4. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de urbanismos, la ocupación de terrenos naturales y la construcción de sistemas de captación de agua lluvia con deficiencias, ha desnaturalizado el proceso de filtración del drenaje natural, [4], induciendo a la pérdida de permeabilidad del suelo natural, siendo sustituido de forma parcial por los sistemas de alcantarillado que pretenden amortiguar la cantidad de lluvia precipitada.

En los últimos 30 años, las urbanizaciones en Colombia han presentado un incremento aproximado de 10%, según información estadística del DANE:

Gráfico 1 Relación crecimiento poblacional urbanísticos y rural



Fuente: (DANE, 2013)

En el Gráfico 1, se evidencia la relación comportamental de los procesos urbanísticos y rurales a lo largo de casi 100 años, permitiendo evidenciar que a mediados de la década de los 60, la urbanización se ha intensificado notablemente respecto al concepto rural.[5]

En una investigación realizada por la Universidad Externado de Colombia, se hace mención del proceso urbanístico en Colombia, que sustenta la versión relacionada anteriormente.



“En Colombia el proceso de urbanización ha sido muy acelerado. La proporción de población residente en cabeceras municipales del país se multiplicó por doce al pasar de dos millones y medio en 1938 a 31,5 millones en 2005”. [5]

Las actividades propias de los desarrollos urbanísticos presentan, entre otras cosas, las deforestaciones, la impermeabilización del suelo con materiales en concreto, la disposición inadecuada de residuos que impiden el correcto funcionamiento de drenajes.[6]

La infiltración natural y la pérdida de permeabilidad por los procesos urbanísticos traen como consecuencia inundaciones, que son un fenómeno natural producido principalmente por la intensidad y exceso de precipitación. Estas se presentan luego que el terreno se satura y el proceso de filtración natural se hace insuficiente. La filtración natural cobra una relevancia dentro de la regulación de los sistemas hídricos, dado que, la alteración de estos sistemas provoca afectaciones en la superficie.[7]

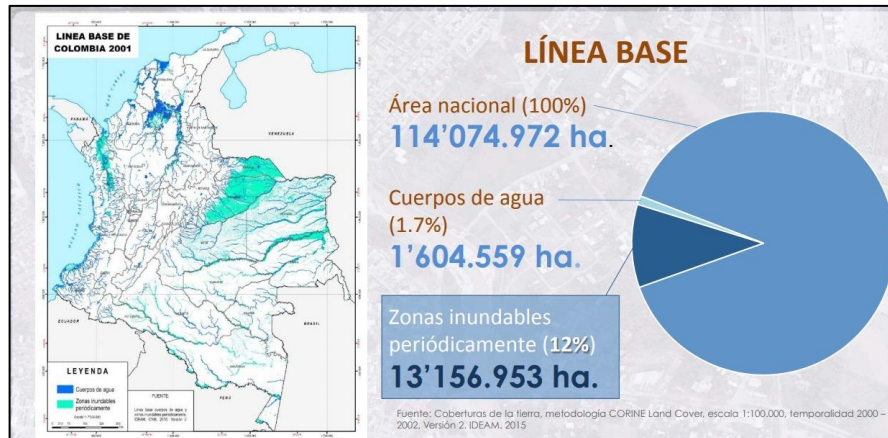
Otra causa que provoca inundaciones de la superficie corresponde a las producidas por las fallencias del sistema de recolección pluvial, que en su mayoría obedece a fallas estructurales, colmatación del sistema por presencia de desechos, falta de capacidad hidráulica de las redes de alcantarillado, manejo inadecuado de captación de drenaje de vías (sistemas combinados), entre otros. Un factor que intensifica esta problemática es el cambio climático, que se caracteriza por la variabilidad mayorada por eventos de alta contaminación.[7]

En Colombia se presentan áreas con probabilidades altas de inundación, como lo sugiere el IDEAM mediante un estudio realizado en el 2018, donde se identificó que en el país existen 190.935 km² correspondientes al 17% del territorio nacional, en condiciones propicias de generar inundaciones, producto de acciones inadecuadas a cargo del hombre. [8]



Es preciso mencionar la relación de zonas inundables registradas en el país, como parte de la identificación de las zonas propensas a presentar problemas de represamiento de aguas que generan deterioro en las superficies.[9]

Gráfico 2 Línea Base Mapas Amenaza por inundación



Fuente: (Línea Base Mapas Amenaza por inundación. Fuente: Coberturas de la tierra, metodología CORINE Land Cover, escala 1:100.000, temporalidad 2000 – 2002, Versión 2. IDEAM. 2015)

El panorama en la capital presenta características similares a las registradas y descritas en el territorio nacional. Existe un reporte del Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático – IDIGER, donde se relaciona las áreas de amenaza de inundación.[7]

Tabla 1 Áreas amenaza alta, media y baja por localidad

No.	LOCALIDAD	AREA	RES. 858 DE 2013		
			AMENAZA		
			ALTA (ha)	MEDIA (ha)	BAJA (ha)
1	USAQUEN	6520,14	30,27	0,00	
2	CHAPINERO	3800,89			
3	SANTA FE	4517,06			
4	SAN CRISTOBAL	4909,85	0,14	0,13	0,40
5	USME	21506,67	15,93	13,08	18,87
6	TUNJUELITO	991,09	60,06	90,64	92,47
7	BOSA	2393,32	224,19	1203,30	189,54
8	KENNEDY	3858,97	123,01	1401,52	91,46
9	FONTIBON	3328,10	110,01	262,82	323,71
10	ENGATIVA	3588,10	224,65	441,26	99,61
11	SUBA	10056,05	1031,27	428,78	173,62
12	BARRIOS UNIDOS	1190,34			
13	TEUSAQUILLO	1419,32			
14	LOS MARTIRES	651,40			
15	ANTONIO NARIÑO	487,95			
16	PUENTE ARANDA	1731,11			
17	CANDELARIA	206,02			
18	RAFAEL URIBE URIBE	1383,41	18,23	3,55	11,87
19	CIUDAD BOLIVAR	13000,26	31,49	20,60	95,64
20	SUMAPAZ	78096,88			
TOTAL		163636,96	1869,24	3865,68	1096,98
TOTAL ÁREA EN AMENAZA		6832			
PORCENTAJE DE AMENAZA EN LA CIUDAD			1,1%	2,4%	0,7%
PORCENTAJE RELATIVO DE AMENAZA			27%	57%	16%

Fuente: (Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático - IDIGER, PROYECTO ACTUALIZACIÓN COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO PARA LA REVISIÓN ORDINARIA Y ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL, Bogotá, Junio 25 de 2018)

En un informe del IDIGER se da a conocer que en promedio de 40 a 60 emergencias se producen por inundaciones en Bogotá, haciendo ver que la insuficiencia de drenaje de agua esorrentía cobra una relevancia dentro de los problemas sociales.[10]

En el Plan Regional de Cambio Climático (2014) se plantea que entre 2011 y 2070, las precipitaciones en la capital se incrementarán de 10% a 20% y se calcula que aproximadamente 6719 personas se encuentran en zona de amenaza media, alta y baja de inundación. [6]

Las consecuencias latentes de inundaciones se vieron reflejadas durante los años 2010 y 2011 con el Fenómeno de La Niña, que produjo niveles de precipitación que superaron el



promedio normal y se generaron inundaciones que afectaron 711 predios y dejaron 32.365 familias afectadas.[6]

La perspectiva internacional de la problemática se ha suscitado en el estudio de alternativas que permitan suplir las condiciones de inundación, como los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), que permiten contrarrestar los efectos generados por los urbanismos dentro del ciclo ecológico. El valor agregado que ofrecen los SUDS, aparte de mejorar los procesos de drenaje, permiten la remoción de partículas contaminantes existentes, la velocidad y el volumen de la escorrentía, además de, anular las láminas de agua o encharcamientos en la superficie de rodadura. [11]

Los pavimentos permeables son estructuras alternas de mitigación de escorrentía superficial que ofrecen una solución a la problemática de inundaciones, en vista que, más de un 70% de áreas urbanizadas están constituidas por vías.[11]

La introducción de esta alternativa constructiva en virtud de los beneficios que presenta en la reducción de los volúmenes de escorrentía ha cobrado una relevancia significativa, al igual que el tratamiento de la carga de contaminación de esta, costos de operación y la innovación en la gestión de las aguas pluviales urbanas.



5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Evaluar la eficiencia drenante de capas granulares en pavimentos articulados permeables mediante la variación de la conductividad hidráulica a partir del grado de compactación, tamaño y distribución de las partículas, y niveles de precipitación.

5.2. Objetivos específicos

Realizar la caracterización física e hidráulica de materiales granulares con variaciones en el grado de compactación, tamaño y distribución de las partículas en capas de pavimento permeables.

Determinar la eficiencia de drenaje de la capa granular en función de distintos niveles de precipitación (intensidad y tiempo) a partir de curvas IDF.

Modelar el flujo con análisis de elementos finitos por medio de un software, en el que se evidencie el comportamiento filtrante a través de las capas de pavimento.

6. ESTADO DEL ARTE

6.1. Antecedentes Históricos

De acuerdo con la Tabla 2, se realiza un recuento histórico de la evolución del pavimento permeable para entrar en contexto acerca de la importancia y utilidad de este sistema y mostrar el auge que su implementación ha tenido a nivel internacional.

Tabla 2 Evolución del Pavimento Permeable

REGISTRO HISTÓRICO	FECHA	DESARROLLO
El hormigón poroso aparece como alternativa al pavimento convencional	Siglo XIX	Se desarrollo con fines estructurales para muros de carga, paneles de relleno y pavimentos
Hubo escasez de cemento finalizando la Segunda Guerra Mundial	1945	Volvió a tomar fuerza La implementación de este tipo de este material
Se propone el concepto de pavimento permeable	1960	Se construye con el fin de mitigar inundaciones, aumentar niveles freáticos y recuperar los acuíferos
Agencia de Protección Ambiental (EPA), pone a prueba los pavimentos permeables	1970	Sitios de ensayo de pavimentos permeables en Texas, Delaware y Pensilvania, EE. UU. Se implementó un equipo de monitoreo en el sitio de prueba en Texas, EE. UU.
Edmund Thelen y L. Fielding Howe publicaron una guía de diseño para pavimentos permeables a finales de la década del 70	1977	Esta guía fundó las bases para el diseño de pavimento permeable que es utiliza hoy en día
En EE. UU. se ha popularizado la implementación y construcción de pavimento permeable en varias ciudades	Siglo XXI	Se ha utilizado principalmente para áreas como entradas para vehículos y aceras hasta espacios comerciales y de varios acres No se recomienda para carreteras, calles y carga pesada

Fuente: Elaboración propia



Nota: Adaptación de datos [12], [13]

Como parte de los procesos investigativos que se adelantan a nivel mundial donde existe la problemática relacionada con procesos de drenaje deficiente y tiempos de filtración, se abordan experiencias, proyectos e iniciativas de índole constructivo que permiten identificar la necesidad con base en antecedentes en la implementación de este tipo de alternativas orientadas a la mitigación y optimización de los sistemas de drenaje.

Es preciso conocer el referente internacional y los conceptos técnicos contemplados para el diseño de la alternativa, con miras a obtener una eficiencia de drenaje óptima que de garantías de vida útil del sistema.

Las investigaciones internacionales con énfasis en el propósito de esta propuesta permiten conocer e identificar los procesos evaluativos en comparación con los avances a nivel nacional tanto en el ámbito investigativo como constructivo.

INVESTIGACIONES INTERNACIONALES

a. Infiltración de escorrentía a través de pavimentos de bloques permeables

Este estudio tuvo como objetivo evaluar la tasa de infiltración en pavimentos de bloques permeables con la variación de distintos criterios como el tipo de material, la separación entre las juntas y el espesor del bloque, en arenas con gradación entre el tamiz 2mm y tamiz 0.063mm. [14]

Esta investigación considera que un pavimento permeable de bloques de hormigón poroso es adecuado para el tráfico y además actúan como sistemas de drenaje, permitiendo el tránsito de agua a través de su estructura hacia la subrasante, proporcionando además una eliminación de contaminación del agua de escorrentía, al pasar por las juntas y la capa de arena.[14]



Es importante determinar la tasa de infiltración para evitar el empozamiento de agua en la superficie del pavimento, esta establece la cantidad de agua que puede pasar a través de él.

La metodología empleada consiste en el diseño de un dispositivo medidor para obtener la tasa de infiltración, exponiendo el pavimento a condiciones reales, realizando variaciones entre el tipo de material, el espesor del bloque y el ancho de la junta para determinar los valores máximos en los que el pavimento cumple con las exigencias propuestas. También se realizó un modelo en el software SPSS para el cálculo de velocidad de infiltración. Y posteriormente se procedió a comparar los resultados de pruebas de laboratorio con los resultados de modelación. [14]

Como resultados se obtuvo que el método de laboratorio y el método numérico no mostró variación importante, y se observó que la tasa de infiltración aumentó cerca de los bloques de hormigón poroso debido a la alta relación de vacíos de la arena de juntas, mientras que, en la modelación del software, al no poderse representar el fenómeno de efecto de pared, se evidenció una alta variación en los resultados, con respecto a los otros dos métodos.

De este resultado se pudo concluir que el efecto de pared en las juntas de bloque es muy importante para el cálculo de tasa de infiltración, ya que se evidenció que al aumentar el tamaño máximo de la arena o disminuir el ancho de la junta, se presentaba una tasa de infiltración más alta y con la disminución del ancho, era más eficaz el fenómeno de efecto pared. [14]

Estos resultados en función a diseñadores de pavimento aportan a tener el control necesario de la tasa de infiltración, a través de la estructura en pavimentos de bloques, estableciendo las variaciones de ancho de juntas y tamaño de partícula del agregado acorde a la intensidad de precipitación que se debe infiltrar.[14]



b. Capacidad de infiltración de los pavimentos fisurados

En esta investigación se estudió la influencia de las grietas en la capacidad de infiltración de superficies impermeables, debido a que los pavimentos fisurados tienen una conductividad hidráulica comparable con la de las arenas y otros materiales granulares, ya que las grietas en las superficies impermeables aumentan las tasas de infiltración. [15]

Los resultados obtenidos en este artículo de investigación demuestran que las fisuras en superficies impermeables permiten infiltrar a través de ellas volúmenes significativos de agua.

Se logra relacionar las tasas de infiltración directamente con las características de las fisuras por medio de un modelo de regresión obteniendo las correlaciones entre estas dos variables.

En el desarrollo de esta investigación se demostró que, al aumentar el ancho de las grietas y el porcentaje de superficie agrietada, la capacidad de infiltración de la superficie aumenta, sin embargo, en hecho de no evaluar el material a colocar en las grietas y el pavimento subterráneo, no se puede establecer el comportamiento definitivo de la estructura de pavimento. [15]

c. Influencia de los sedimentos en el rendimiento hidrológico de un pavimento permeable

En el análisis realizado en esta investigación, se evaluó la influencia de los sedimentos en el rendimiento hidrológico de un pavimento permeable- Esta investigación se desarrolló en Reino Unido para un periodo de diseño de 10 años. [16]

Se considera que los pavimentos desempeñan una función importante entre los sistemas de drenaje urbano sostenible, debido a que, mitiga la escorrentía superficial en las zonas urbanas, además de aportar a la filtración de algunos materiales contaminantes que trae consigo la escorrentía. La vida útil de un pavimento permeable es el tiempo en que su tasa



de infiltración de descienda a niveles inaceptables. Esta pérdida de capacidad filtrante viene a causa de la disminución de permeabilidad de los materiales, debido al depósito de sedimentos dentro de la estructura. Con el fin de materializar esta idea, se construyó una sección de pavimento permeable a escala real de un aparcamiento, basándose en, las especificaciones de diseño del manual SUDS, al que se le suministró por medio de un simulador de lluvia una cantidad de agua consistente al volumen, intensidad y duración de las precipitaciones. Y se instaló un caudalímetro con el que se medía la tasa de entrada y salida. [16]

El estudio arrojó resultados para un periodo de 10 años, donde la obstrucción por sedimentos en las juntas del pavimento produjo una disminución del 6-4% del flujo de salida total, una disminución del 41% de la tasa de salida y un aumento del 9 al 5 % en el tiempo de inicio de salida. [16]

La conclusión a la que se llegó permite observar que los sedimentos en la estructura de pavimento provocan una obstrucción parcial, lo que lleva a una disminución en la tasa de infiltración y de volumen de agua de salida, y un aumento de tiempo de inicio y salida del agua infiltrada. [16]

En el periodo estudiado el pavimento expuesto a cargas de lluvia y sedimentos evidenció una capacidad filtrante óptima si necesidad de mantenimiento en un periodo de 10 años.

Con los resultados obtenidos se puede dar una representación valida de los procesos que se presentan en una estructura de pavimento permeable, por lo que pueden ser usados como base para entender el comportamiento y funcionalidad en proyectos. [16]



d. Aprobaciones Técnicas Generales para Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible Descentralizado (SUDS) - La situación actual en Alemania

La funcionalidad de los dispositivos técnicos comunes en los SUDS, aparte de realizar los procesos de captación de aguas escorrentía en zonas urbanas, se utilizan dentro de los procesos de eliminación de los contaminantes presentes en esta.[17]

Los SUDS implementados en esta alternativa son los pavimentos permeables, canales de filtrado y sistemas de pozos de filtrado.[17]

La investigación se llevó a cabo en Renania del Norte-Westfalia, Alemania, donde, se adoptó la instalación de un pavimento de hormigón entrelazado permeable (PICP), que logra el drenaje de la escorrentía a través de las juntas entre los adoquines y en la estructura. [17]

Estos sistemas alternativos descentralizados están en la capacidad de eliminar al menos el 50% de las partículas de menos de 63 μm de tamaño de la escorrentía de las aguas pluviales.

El valor agregado que presentan el sistema permeable instalado, costa de un aporte en el aumento de la evaporación, ayudando a restablecer el ciclo hidráulico natural, además de los aportes, ambientales que se han identificado a lo largo de la investigación. [17]

La instalación del sistema permeable trajo consigo el aumento considerable de la tasa de infiltración de las aguas subterráneas y de forma paralela, la reducción de volúmenes de escorrentía aguas abajo y el riesgo de presentar inundaciones. [17]

La capacidad media de infiltración del pavimento debe monitorearse o medirse al menos una vez cada cinco años para garantizar la tasa de infiltración en la superficie, de como resultado un valor superior a 97,4 mm/h, en vista del cumplimiento normativo de tasas de descarga que regula el gobierno local. [17]



El mantenimiento de la superficie de pavimento depende del valor de 97,4 mm/h, del cual, la tasa de infiltración no puede ser inferior, con lo cual se garantiza la vida útil del sistema drenante. [17]

El sistema descentralizado de drenaje de escorrentía está en capacidad de eliminar al menos el 50% de las partículas de menos de 63 μm de tamaño.

Los resultados obtenidos se resumen así: la retención de partículas presentes en la escorrentía, la medición de la tasa de infiltración y la programación del mantenimiento preventivo y correctivo dependiente del valor de tasa medido.

Mediante la investigación se identificó que el sistema puede eliminar eficazmente una variedad de contaminantes de las aguas pluviales, incluyendo TSS, TP, TN, metales pesados y aceites de motor.[17]

Los SUDS de drenaje descentralizado ofrecen una alternativa llamativa para el tratamiento y disposición final del caudal captado.

Los niveles de contaminación permitidos en la escorrentía que se infiltran en el suelo de fundación y al nivel freático dan cumplimiento a la Ley Federal de protección del suelo que rige en toda Alemania. [17]

e. Guía de diseño CIRIA

En el diseño de sistemas de drenaje sostenible, se presenta la guía de diseño internacional CIRIA [18], que hace referencia a la implementación de sistemas que buscan maximizar los beneficios en el control de aguas escorrentía y minimizar el impacto que representa las aguas superficiales en las áreas desarrolladas.

Por otra parte, el diseño de SUDS permite adoptar un enfoque que brinda la oportunidad mejora de espacios verdes dentro de los desarrollos y conectarse con otros sistemas,

apoyando la provisión de hábitat para ecosistemas aledaños, además de, realizar un aporte a la salud, bienestar y calidad de vida.

El manual muestra diferentes tipos de SUDS entre los que se encuentra: Rain Water Harversting (Recolección de aguas lluvia), Green roofs (techos verdes), Infiltrations Systems (Sistemas de infiltración), Previous Pavement (Pavimento Permeable), Filtrrs Strips (Tirras de filtro), entre otros.

El diseño de pavimento que presenta la guía se constituye por análisis de la estructura hidráulica, de comodidad y con base en criterios de biodiversidad. El diseño del perfil presenta una capa de rodadura, capa de colocación, material granular seleccionado y un sistema de conducción y almacenamiento temporal de agua esorrentía.

En referencia al material granular o capa estructural, se define mediante requerimientos técnicos de gradación del material de grava con base a rangos admisibles definidos por un juego de tamizado.

Se emplea un geotextil dentro entre las capas para que no haya perdida de material por exceso de filtración.

La estructura de drenaje se define mediante los requerimientos de volumen de caudal a infiltrar, en tres tipos infiltración: filtración total, parcial y sin infiltración.

f. Guía de diseño INTERPAVE

La guía o manual internacional para pavimento permeable de INTERPAVE [19] en el Reino Unido, orienta su diseño, construcción y mantenimiento de este tipo de estructuras, con base en las recomendaciones del manual de SUDS de CIRIA.



La alternativa que se brinda con el diseño de pavimento permeable de bloque de hormigón es ofrecer una estructura que tenga una doble función: actúa como un sistema de drenaje, además de, soportar las cargas de tráfico, permitiendo que el agua pase a través de la superficie o bloques de hormigos hacia la sub-base permeable que presenta propiedades granulares clasificadas y con una condición de infiltración alta, además de, permitir el almacenamiento de agua temporal para un uso posterior.

INVESTIGACIONES NACIONALES

a. Pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano

En el ámbito nacional Espinosa Castro, 2011, realizó una investigación acerca de los pavimentos permeables como alternativa de sistema urbano de drenaje. Los resultados obtenidos sirven de insumo para la implementación de un pavimento en Guaymaral, Bogotá, con un tipo de suelo blando, arcilla limosa CBR 3 a 6%.

Se consideró el pavimento permeable como una alternativa de sistema de drenaje urbano sostenible, que aporta en la disminución de escorrentía superficial, mitigando la problemática de inundaciones en zonas urbanizadas, ya que genera zonas de infiltración y/o almacenamiento del agua de precipitación. Siendo recomendables principalmente para zonas de bajo tráfico. [11]

Estos sistemas minimizan los impactos del ciclo hidrológico, controlando los niveles de agua para mitigar inundaciones y reduciendo la contaminación del agua de escorrentía. Para este sistema se presentan varias alternativas de implementación en los que se dividen en estructurales y no estructurales. Donde se presentan los pavimentos permeables como una alternativa estructural. [11]

Este documento, brinda una investigación exhaustiva de los pavimentos permeables como sistema urbano de drenaje sostenible. Que puede ser usada como insumo en el diseño de un pavimento permeable, dependiendo de las necesidades de flujo a infiltrar en la zona



intervenida. Por medio de los resultados obtenidos se puede inferir que los pavimentos permeables son una alternativa viable, que representa una solución a la problemática de inundaciones en las zonas de ronda del río Bogotá. [11]

b. Pavimentos Porosos utilizados como alternativa de Drenaje Urbano

Para sustentar de forma práctica lo planteado por la teoría se realiza la implementación en Bogotá, Colombia. Calle 40 entre las carreras 7 y 13, que, de acuerdo con estudios previos, se definió que, por su condición de tráfico y densidad poblacional, es una zona ideal para realizar los pavimentos porosos, además de ser una zona residencial donde predomina los espacios abiertos y empedrados. [20]

La muestra de material que caracteriza el sitio de colocación del sistema drenante se constituye de rellenos superficiales e intercalaciones de capas arcillo-limosas con rastros ocasionales de arena fina que anteceden a los materiales propios del perfil de meteorización de la formación Bogotá. En la parte superior de la unidad- conformado por arcillas y arcillolitas laminadas abigarradas (grises, violáceas, moradas y rojas) de resistencia mecánica alta (elevada capacidad portante y baja deformabilidad). [20]

Dentro de la investigación para determinar el espesor de capa, se contempla el coeficiente de escorrentía, valor el cual se calcula entre el volumen de agua de escorrentía presente en la superficie y el volumen total de precipitación en un tiempo determinado. [20]

Dentro de los métodos de diseños aplicados se realizan los siguientes métodos de diseño hidrológico con base en la información que entrega las curvas IDF. El método de curva envolvente, metodología Chile, The SUDS manual y el método de lluvias). Los métodos de volúmenes y método de calidad se realizan con las series de precipitación (método simplificado y método hidrológico de pequeñas tormentas). [20]

Los resultados del procedimiento permiten conocer los valores de capacidad de infiltración del suelo, correspondiente a 146.3375 mm/h. [20]



La relación de proporcionalidad entre el periodo de retorno y el espesor es directa, lo cual indica que, a medida que el periodo de retorno aumenta, el espesor de capa presenta el mismo comportamiento. [20]

En cuanto al valor de coeficiente de infiltración, el valor obtenido corresponde a 73.169 mm/h. El valor de porosidad del modelo de pavimento poroso, correspondiente a 0,18.

Finalmente se concluye que se identifican las ventajas de estos sistemas descentralizados urbanos con relación a los sistemas de captación de aguas lluvia convencionales, en específico a los métodos de diseño, métodos constructivos y de mantenimiento de la estructura. [20]

Es pertinente tener en cuenta la siguiente información acerca de proceso constructivo de los pavimentos porosos, donde se comenta la escasa información sobre la construcción de este tipo de estructuras. Se refiere sobre los métodos encontrados provienen de la construcción de los pavimentos convencionales (impermeables), lo cual infiere que dichos procedimientos no cumplan con los requerimientos de funcionalidad y con el objeto misional de los pavimentos permeables: permitir la infiltración del fluido a través de sus capas sin presentar impacto en su capacidad y su estabilidad. [20]

c. Investigación Para El Desarrollo De Sistemas Urbanos De Drenaje Sostenible (Suds) En La Ciudad De Bogotá

La investigación realizada por HERNÁNDEZ & MACEA, 2014, establece como principio conceptual que los pavimentos permeables permiten el paso de agua a través de su estructura para posteriormente, ser entregada a la subrasante o ser retenida para su posterior reutilización o drenaje. Trae como beneficio la mitigación de escorrentías pico, y a mejorar la calidad del agua al ser infiltrada.



La metodología establece una investigación de los antecedentes para evidenciar, las problemáticas presentadas por la deficiencia en los sistemas urbanos de drenaje sostenible en Bogotá y compararlo con ciudades con condiciones similares para conocer parámetros que permitan mejorar los sistemas de drenaje en la capital. [21]

Por último, se llega a la conclusión que los niveles de precipitación en Bogotá representan una problemática debido a la deficiencia de drenajes en la zona, lo que genera inundaciones y afectaciones en las vías. Sin embargo, estos niveles de precipitación, con la implementación de un sistema urbano de drenaje sostenible, permitiría el aprovechamiento de esta como mitigador de problemáticas en el desabastecimiento de agua. [21]

Conclusión. Las investigaciones nacionales e internacionales y la implementación de este tipo de alternativas dentro del contexto mundial logran articular los conceptos y problemáticas a nivel nacional y local que han sido objeto de experimentación de este sistema, dejando en evidencia que el propósito fundamental de la tecnología permite mitigar problemas hidráulicos, controlar los caudales provenientes de aguas lluvias y el almacenaje para posterior tratamiento.

En Bogotá una de las problemáticas relacionadas con niveles de precipitación, es la falta de drenaje de agua esorrentía que provoca inundaciones y contaminación de agua. Lo que conlleva a un desperdicio de agua potencial de uso para abordar la problemática de escasez de agua. Esto se justifica mostrando la cantidad de emergencias presentadas en Bogotá por el déficit de drenaje.

Al elaborar el estado del arte en función del marco teórico, se logra realizar un paralelo de los conceptos objeto de investigación, de la problemática identificada, de los procesos constructivos y los elementos que sirven de insumo para conocer las características hidráulicas del pavimento permeable y sus capas granulares.

Se reconoce el valor agregado o relevancia técnica que se realiza con la presente investigación al ejecutar los ensayos de laboratorio (Proctor, CBR, Permeabilidad), a

combinaciones de agregados con gradaciones definidas y de los cuales se presentarán recomendaciones y sugerencias en torno a los niveles de precipitación, con relación a las consultas registradas en el Estado del Arte.

Se evidencia poca investigación relacionada con el comportamiento de conductividad hidráulica y el grado de compactación que debe tener la capa granular en función del drenaje de caudal. Dicho análisis se realizará como parte del proceso investigativo de esta propuesta sustentado partir de los resultados de laboratorio, generación de cálculos, modelación con SLIDE para determinar el caudal infiltrado según cada capa granular y poder establecer las curvas de grado de compactación vs. Conductividad hidráulica.

d. Manual de drenaje para carreteras

La normatividad Colombiana por medio del Instituto Nacional de Vías INVIAS, [22], presenta un manual donde se establece las condiciones de diseño de pavimento permeable por medio del análisis y el diseño de un drenaje subsuperficial que considera cuatro (4) categorías, entre las que se encuentran: la geometría de dominio del flujo, las propiedades de los materiales existentes, los datos climatológicos, además de, información adicional.

La geometría del dominio del flujo, analiza el diseño geométrico de la vía, además de, las condiciones de drenaje existentes. La relación de drenaje interno y la constitución del tramo de vía permiten identificar problemas asociados a la infiltración en función de la escorrentía presente en el sitio de diseño.

Las propiedades de los materiales deben dar cumplimiento a requerimientos de tamaños de partículas que logran estimar el comportamiento de este respecto a la transmisión del flujo de agua o capacidad permeable de la capa. Los procedimientos con los cuales se logra determinar la capacidad de permeabilidad consisten en ensayos de campo, ensayos de laboratorio, la estimación de resultados por medio de la teoría y la aplicación de metodología empírica y sus correlaciones.



El caudal de diseño de este tipo de pavimentos lo establece los datos climatológicos y el dato de altitud de la región de estudio. Las precipitaciones y sus características proporcionan un insumo de relevancia para el diseño y la eficiencia de la capa.



7. MARCO TEÓRICO

7.1. Materiales Granulares

La estructura de pavimento está compuesta por una o varias capas de material seleccionado, colocados técnicamente sobre una subrasante, con capacidad de soportar las cargas interpuestas por el tránsito y el clima. La estructura de pavimento está en la capacidad de transmitir al suelo de fundación o subrasante, esfuerzos y deformaciones admisibles y de forma paralela, proporcionar comodidad, seguridad y economía.

Los pavimentos se constituyen, por lo general, de capas de material compacto que dan firmeza al terreno y sirven de soporte a la capa de rodadura. (Montejo Fonseca, 2006. pág. 1, 2)

7.1.1. Base Granular

Es la capa principal de la estructura del pavimento que se instala y se compacta de forma directa encima de la subbase, cuya función principal es proveer capacidad estructural y suministrar un apoyo uniforme, permanente y estable al pavimento, además de transmitir las cargas de forma distribuida a la subbase. La base granular presentan diversidad de gradaciones que se definen a partir de requerimientos técnicos definidos en las normas de construcción de pavimentos (INVIAS, IDU). [24]

La normatividad técnica establece los parámetros y valores admisibles mediante las propiedades físicas del agregado y su uso dentro de un pavimento. A continuación, se adjunta las tablas Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), se muestra la correspondencia entre clases de capas granulares, el tipo de pavimento y las categorías de tránsito, además de las propiedades evaluadas, la norma de ensayo y la clase de base granular.



Tabla 3 Correspondencia entre clase de capas granulares, el tipo de pavimento y las características de tránsito

Tabla 400.1 Correspondencia entre clases de capas granulares, el tipo de pavimento y las categorías de tránsito				
Tipo de Capa	Categorías de Tránsito			
	T0 – T1	T2 – T3	T4 – T5	PEATONAL (1)
Pavimento Asfáltico				
Base Granular	BG_C	BG_B	BG_A	
Subbase Granular	SBG_C	SBG_B	SBG_A	
Pavimento de Losas de Concreto de Cemento Pórtland				
Base Granular	BG_B	BG_A	NA	
Subbase Granular	SBG_C	SBG_B	SBG_A	
Andenes y Estructuras peatonales				
Base Granular				NA
Subbase Granular				SBG_PEA

Nota (1) Para las zonas donde se presente tráfico mixto vehicular y peatonal como en los accesos el material se debe elegir de acuerdo con el tránsito

Fuente: (IDU - Capítulo 4. Subases y bases, 2011)

Tabla 4 Requisitos de los agregados para bases granulares

Ensayo		Norma de Ensayo	Clase de Base Granular		
			BG C	BG B	BG A
Dureza					
Desgaste Los Angeles	- En seco, 500 revoluciones, % máximo	INV E-218-07	40	40	35
Micro Deval, % máximo	- Agregado Grueso	INV-E-238-07	30	25	20
10% de finos	- Valor en seco, kN mínimo - Relación húmeda/seco, % mínimo	INV-E-224-07	60 75	75 75	100 75
Durabilidad					
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, % máximo	- Sulfato de Magnesio	INV E-220-07	18	18	18
Limpeza					
Limite Líquido, % máximo		INV E-125-07	25	25	25
Índice de Plasticidad, % máximo		INV E-126-07	3	No plástico	No plástico
Equivalente de Arena, % mínimo (1)		INV E-133-07	20	20	20
Valor de Azul de Metileno, máximo		INV-E-235-07	10	10	10
Terrones de arcilla y partículas deleznales, % máximo		INV E-211-07	2	2	2
Geometría de las Partículas					
Partículas Fracturadas Mecánicamente, % mínimo	- 1 cara - 2 caras	INVE-227-07	60 40	85 60	85 60
Índice de Aplanamiento, % máximo (2)		INV E-230-07	35	35	35
Índice de Alargamiento, % máximo (3)		INV E-230-07	35	35	35
Angularidad del Agregado Fino, % mínimo		INV-E-239-07	35	35	35
Capacidad de Soporte					
CBR, % mínimo	- Referido al 100 % de la densidad seca máxima, según el ensayo INV E-142-07 (AASHTO T 180), método D, después de 4 días de inmersión.	INV E-148-07	80	100	100

NA = No Aplica
(1) En caso de que el equivalente de arena sea inferior pero se cumpla plasticidad y azul de metileno, se aceptará el material con un concepto del desempeño por

Fuente: (IDU - Capítulo 4. Subases y bases 2011)



Tabla 5 Requisitos de los agregados para subbases granulares

Tabla 400.3 Requisitos de los agregados para subbases granulares						
Ensayo		Norma de Ensayo	Clase de Subbase Granular			
			SBG_PEA	SBG_C	SBG_B	SBG_A
Dureza						
Desgaste Los Angeles	- En seco, 500 revoluciones, % máximo	INV E-218-07	50	45	40	40
Micro Deval, % máximo	- Agregado Grueso	INV E-238-07	NA	35	35	30
10% de finos	- Valor en seco, kN mínimo - Relación húmeda/seco, % mínimo	INV E-224-07	NA	40 65	50 70	60 75
Durabilidad						
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, % máximo	- Sulfato de Magnesio	INV E-220-07	18	18	18	18
Limpieza						
Limite Líquido, % máximo		INV E-125-07	40	25	25	25
Índice de Plasticidad, % máximo		INV E-126-07	10	6	3	3
Equivalente de Arena, % mínimo (1)		INV E-133-07		18	18	20
Valor de Azul de Metileno, máximo		INV E-235-07		10	10	10
Terrones de arcilla y partículas deleznales, % máximo		INV E-211-07		2	2	2
Geometría de las Partículas						
Partículas Fracturadas Mecánicamente, % mínimo	- 1 cara - 2 caras	INV E-227-07	NA NA	NA NA	NA NA	50 30
Índice de Aplanamiento, % máximo (2)		INV E-230-07	NA	NA	NA	NA
Índice de Alargamiento, % máximo (3)		INV E-230-07	NA	NA	NA	NA
Angularidad del Agregado Fino, % mínimo (RO)		INV E-239-07	NA	NA	NA	NA
Capacidad de Soporte						
CBR, % mínimo - Referido al 95 % de la densidad seca máxima, según el ensayo INV E-142 -07 (AASHTO T 180), método D, después de 4 días de inmersión.		INV E-148-07	20	30	40	60

NA = No Aplica

(1) En caso de que el equivalente de arena sea inferior pero se cumpla plasticidad y azul de metileno, se aceptará el material con un concepto del desempeño

NA = No Aplica

(1) En caso de que el equivalente de arena sea inferior pero se cumpla plasticidad y azul de metileno, se aceptará el material con un concepto del desempeño

Fuente: (IDU - Capítulo 4. Subases y bases, 2011)

7.1.2. Subbase Granular

Es la capa estructural que se localiza entre la base y la subrasante. Esta capa está constituida de un material granular de características diferentes al de la base y, por lo general, de un mayor espesor. La subbase granular, por sus propiedades de menor calidad, representan un valor económico más bajo respecto a las de la base. La subbase cumple funciones de filtración de agua ante la subrasante. En términos de resistencia, esta capa debe soportar esfuerzos interpuestos por el tránsito y distribuidos de forma adecuada a la subrasante. Para la construcción de una subbase, se deben tener en cuenta los requerimientos normativos.



7.1.3. Subrasante

La subrasante o suelo de fundación, es la capa que recepciona las cargas transmitidas por la base y subbase. La calidad de esta capa y su módulo resiliente depende los espesores de las capas granulares. El estudio de este suelo de fundación es muy importante, puesto que, debe ser un material no susceptible a cambios de humedad, lo cual tiene implicaciones en fallas estructurales.

De ser necesario y acorde a los resultados de ensayos de laboratorio, la subrasante debe garantizar la vida útil del pavimento, razón por la cual, se debe estabilizar este tipo de suelo con elementos aditivos que permitan mejorar las condiciones de capacidad portante. El aditivo de menor rendimiento de estabilización es la cal. (Montejo Fonseca, 2006, pág. 8)

7.1.4. Conductividad Hidráulica en materiales granulares

La conductividad hidráulica o también llamada permeabilidad es una propiedad del suelo o capa de pavimento que indica la facilidad relativa con la cual un fluido es capaz de atravesarlo. Las unidades empleadas para medir la conductividad hidráulica relacionan dimensiones de longitud por tiempo en el Sistema Internacional de Unidades. Es importante identificar el coeficiente de permeabilidad, dado que con esta información, se logra determinar la calidad del drenaje a lo largo de la estructura.[25]

La conductividad hidráulica de un suelo varía dependiendo de las características propias del material entre las que se contemplan; el tamaño de las partículas, el grado de saturación, la relación de vacíos, la composición y para el fluido se contempla su viscosidad y peso específico. [26]

Para obtener el coeficiente de permeabilidad se parte de la ley de Darcy, de donde se obtiene la siguiente ecuación.[25]



Ecuación 1 Ecuación Darcy

$$v = k * i$$

En donde se relacionan las variables de Velocidad (v) con la que el fluido atraviesa el medio poroso, el gradiente hidráulico (i) y el coeficiente de permeabilidad (k)

Para la determinación del coeficiente de permeabilidad se realiza el ensayo de la norma INV E-130-13 PERMEABILIDAD DE SUELOS GRANULARES (CABEZA CONSTANTE) [27] por medio de cargas hidráulicas, constantes y variables.

En el ensayo con cabeza variable es usado en materiales de tamaño fino como arenas finas, limos y arcillas, pasa tamiz #200. Este ensayo se obtiene el coeficiente de permeabilidad por medio de la formula. [28]

Ecuación 2 Coeficiente de Permeabilidad - Ensayo Cabeza Variable

$$k = 2.3 \frac{aL}{A(t_1 - t_0)} \log_{10} \left(\frac{h_0}{h_1} \right)$$

En donde se contemplan las variables

- a = Sección transversal de la bureta
- L = Longitud de la muestra de suelo en el permeámetro
- A = Sección transversal del permeámetro
- t_0 = instante en el que el nivel de agua en la bureta está en h_0
- t_1 = instante en el que el nivel de agua en la bureta está en h_1
- h_0, h_1 = alturas entre las que se determina la permeabilidad

Mientras que el ensayo de cabeza constante es usado en materiales de tamaño grueso, como las gravas y arenas, entre tamiz $\frac{3}{4}$ " y retiene tamiz #200. Por medio del equipo permeámetro de carga constante para hallar el coeficiente de permeabilidad con la siguiente formula. [27]

Tabla 6 Coeficiente de Permeabilidad Cabeza Constante

$$k = \frac{QL}{Ath}$$

Relacionando las variables de

- k = Coeficiente de permeabilidad
- Q = La cantidad de agua descargada
- L = Distancia entre manómetros
- A = Área de la sección transversal del espécimen
- t = Tiempo total de desagüe
- h = Diferencia de cabeza en los manómetros
-

Como referencia en [26], se mencionan coeficientes de permeabilidad generales dependiendo el grado de permeabilidad del suelo

Tabla 7 Coeficientes de Permeabilidad

Grado de permeabilidad	Valor de k (cm/seg)
Elevada	Superior a 10^{-1}
Media	$10^{-1} - 10^{-3}$
Baja	$10^{-3} - 10^{-5}$
Muy baja	$10^{-5} - 10^{-7}$
Practicante impermeable	Menor de 10^{-7}

Fuente: Lambe y Whitman, Mecánica de suelos - Lambe y Whitman.pdf. 2004

7.1.5. Grado de compactación en capas granulares de pavimentos

El grado de compactación es una característica esencial y de pertinente evaluación para la construcción de pavimentos convencionales en función de las variables estructurales, de tránsito y climáticas. De igual modo, la conductividad hidráulica involucra la compactación de la capa en virtud de la relación de vacíos existentes en el agregado, los cuales propician la acción de infiltración del fluido.

Las propiedades de los materiales como la compactación permiten establecer la variación de la estructura de la capa granular y sus características mecánicas e hidráulicas, lo cual se evidencia en los resultados de permeabilidad, peso específico y resistencia al corte.

La compactación es un proceso mecánico que busca el mejoramiento de las características de resistencia, compresibilidad y relación esfuerzo-deformación, que implica a su vez, un cambio en el volumen, pérdida de aire y agua y una relación de vacíos.

Teniendo en cuenta lo anterior, la evaluación de la compactación de la capa granular, seguirá el procedimiento mencionado en el Normatividad Técnica INVIAS: INV E – 142 - 13 - RELACIONES DE HUMEDAD - PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)¹, o también conocido como ensayo Proctor modificado, que define los valores de densidad seca máxima y humedad optima.

7.1.6. Procesos de Captación de agua escorrentía

Dentro de los procesos de urbanización realizados en las ciudades y poblaciones, han contemplado el tema de infiltración de agua mediante la construcción de sistemas de alcantarillado pluvial y combinado, la captación y conducción de agua escorrentía mediante elementos propios del sistema, como sumideros, pozos de inspección y colectores. Sin embargo, ha sido evidente que estos sistemas presentan falencias respecto a la completa captación de la escorrentía, dado que, este sistema suele colapsar por la falta de mantenimiento y daños operativos que presenta a lo largo de sus redes.

La alternativa de ampliar el área de captación de agua permite la eficiencia del sistema al contar con material permeable que brinda un proceso de infiltración caracterizado por materiales granulares con propiedades permeables que logran que la acumulación de este volumen no permanezca en la superficie de la capa de rodadura.

¹ FUENTE (Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras INVIAS. 2013)



Los materiales granulares con propiedades particulares permiten un aprovechamiento de los procesos de infiltración en superficies de bajo tránsito.

La tasa de infiltración es una de las propiedades de mayor relevancia y objeto de estudio de esta propuesta y cuyo antecedente se sustenta, como lo menciona [14], en donde se describe la importancia del estudio de las propiedades de los materiales y la tasa de infiltración en función de los procesos de compactación.

La tasa de infiltración mide la capacidad que tiene el suelo de absorber la precipitación. Esta es medida en milímetros por hora y si la tasa de precipitación supera la tasa de infiltración, se producirá escorrentía. [29]

Para la infiltración, se contemplan dos variables muy importantes, que son la gravedad y la acción capilar. Además de las características del suelo como la relación de vacíos, la capacidad de almacenamiento y la facilidad de transferencia por el suelo. [29]

Al medir la tasa de infiltración se contemplan la estructura y disposición del suelo, el contenido de agua, la temperatura y la intensidad de precipitación que este va a infiltrar. Para mostrar un ejemplo de estas variables se puede mencionar un suelo arenoso con grano grueso, en donde se presenta una relación de vacíos alta y por ende permite la infiltración de agua de manera más rápida. [29]

El proceso de infiltración varía debido a la relación de poros y la tasa de infiltración que tenga el suelo. Para conocer la capacidad de infiltración de un suelo, es necesario evaluar la tasa máxima de agua que puede captar el suelo, si la precipitación excede la capacidad de infiltración de un suelo, se producen niveles de agua de escorrentía. [29]

El drenaje de la estructura se relaciona de forma directa con el control de infiltración. El beneficio que brinda el sistema funcional se define a partir de las variables climáticas, de constitución de las capas granulares, la geometría de la vía y el diseño del pavimento. Esto



a su vez, da importancia de la propiedad de conductividad y la capacidad de un drenaje rápido, en donde exista una reducción del tiempo en virtud de la saturación del material.

La relación del tiempo de drenaje de la capa de pavimento y el valor porcentual de saturación de la estructura, son variables incidentes que determinan la calidad del drenaje. De lo anterior se puede inferir en la existencia de una proporcionalidad inversa relacionada con la calidad de drenaje consistente en: cuanto más baja la calidad de drenaje, se evidenciará un mayor impacto adverso en el comportamiento del pavimento. (Ministerio de Transporte, 2009, pág. 323)

7.1.7. Pavimento Permeable

Los pavimentos hacen parte fundamental de los procesos constructivos urbanos, sin embargo, este tipo de estructuras son partícipes de limitar los procesos naturales de filtración, además, la impermeabilización de la superficie genera exceso de caudal que se capta mediante las redes de alcantarillado pluvial. Los excesos de caudal presentes en las zonas urbanísticas se convierten en inundaciones y su impacto se hace más prominente aguas abajo de los ecosistemas y zonas de drenaje natural. [20]

Debido al exceso de caudal presente en la superficie, se debe implementar alternativas al drenaje urbano que logre mejorar las características de filtración y que, a su vez, mitigue la acumulación de aguas lluvias en la superficie.

Uno de los sistemas alternativos que presenta un mejoramiento de las condiciones de permeabilidad son los pavimentos permeables, los cuales se conforman de la mezcla de agregados gruesos con gradación uniforme, un contenido bajo de finos y un conglomerante, que puede ser una mezcla bituminosa o en concreto, que permita que el porcentaje de vacíos oscile entre un 15 % y 20 %. (Quiroz Lasprilla & Trujillo López, 2018, pág. 16)

El uso de pavimentos permeables ha tomado una gran relevancia en la era moderna de las obras civiles y proyectos de ingeniería como un método alternativo para minimizar el caudal



de escorrentía presente en capas de rodadura de alto, medio y bajo tráfico. Adicional a esto, el favorecimiento de procesos de infiltración ha generado reducción en el deterioro de la vida útil de la capa de rodadura y aporta a los procesos de infiltración de zonas impermeables generadas por el desarrollo urbanístico.

Los pavimentos permeables nacen como una forma alternativa de mitigación de la escorrentía superficial y los caudales pico (generadores de inundaciones), en las zonas urbanizadas en las cuales la cuenca ha perdido su permeabilidad. El objetivo de estos sistemas es generar zonas donde el agua se infiltre o se almacene amortiguando la cantidad de agua lluvia precipitada y aumentando los tiempos de concentración de esta. Se recomienda su uso en zonas de baja pendiente, con poco tráfico tales como estacionamientos, vías con tráfico ligero u ocasional, y andenes, entre otros, en los que su nivel freático se encuentre muy por debajo del fondo de la zona de almacenamiento para que este no interfiera ni disminuya el volumen de acopio (Legret et al., 1999; EPA, 1999)[11]

Los beneficios que trae consigo la implementación de esta tecnología, no solo a nivel económico sino, además, ambiental, de control de niveles de precipitación y facilidades en su proceso constructivo. Un referente que soporta lo antes mencionado, es la investigación realizada en Cartagena, donde “se diseña un campo de prueba de pavimentos permeables con el fin de identificar beneficios en el manejo de aguas lluvias en la ciudad de Cartagena”[30], y el cual, se considera de suma relevancia para el propósito de la iniciativa de este proyecto.

Un pavimento permeable como menciona [11], generalmente en su estructura consta de tres capas que son:

1. Una capa de rodadura que permita la entrada de agua, que puede ser en distintos materiales
2. Una capa de transición que permite una instalación adecuada de la capa de rodadura, esta debe ser de un material fino



3. Una capa de sub-base que puede ser usada para infiltrar y retener el agua parcial o completamente.
4. Como en el presente trabajo se va a tratar el tema de pavimentos articulados permeables en hormigón poroso, se hace necesario mencionar el uso de estos como capa de rodadura.

Para esto procedemos a citar a [14] y en [11] en donde se indica que el pavimento en bloques de hormigón permeable tienen el beneficio, el paso de agua entre las juntas de infiltración, que es la parte del pavimento adoquinado que cuenta con una mayor capacidad de infiltración, hacia la capa de colocación y la sub-base y se procede a ser liberado en la sub-rasante lentamente. Para las juntas de infiltración es necesario realizar un emboquillado con arena que pase el tamiz # 8 o con material del usado en la capa de transición.

Estos pavimentos debido a la junta de infiltración y a la capa de transición, tienen una alta eficacia en la eliminación de la contaminación de las aguas de escorrentía.

En cuanto al proceso de infiltración de escorrentía, se presenta una particularidad relacionada con el porcentaje de caudal filtrado y el tiempo de drenaje. Mediante la experimentación con estos pavimentos se ha evidenciado que el porcentaje de drenaje al sistema de captación de agua, varía entre el 11 % y el 45 % durante el evento de lluvia. No obstante, en la posteridad existe un remanente de drenaje correspondiente aproximadamente a más de la mitad de la escorrentía filtrada. Este caudal se drena entre 2 y 4 días posteriores a las lluvias.

Lo anterior, se interpreta como un proceso hidráulico de almacenamiento a largo plazo, puesto que, la reducción del volumen de la escorrentía se realiza los puntos críticos, sin embargo, se debe considerar dentro del diseño, el volumen de escorrentía presente en la capa de rodadura con el fin de establecer sistemas que estén en la capacidad de resguardar el fluido en los periodos de drenaje establecidos. Para lo cual, se debe acudir al manual de

diseño SUDS para definir condiciones técnicas del sistema de recolección y almacenamiento. [19]

7.1.8. Diseño Estructural

Dentro del diseño estructural del pavimento permeable se establecen variables particulares que difieren de las contempladas en el diseño de pavimentos convencionales. El definir un espesor de subbase estructural constituye el requerimiento principal de diseño, además de, contemplar una resistencia acorde con las solicitudes de servicio de la categoría de tráfico, sin indicios de deformaciones importantes.

Los requerimientos de diseño se establecen mediante los siguientes pasos:

- Establecer una categoría de tránsito para conocer las solicitudes de servicio o cargas.
- Precisar la calidad, gradación y características hidráulicas del material granular.
- Definir un espesor de capa granular.
- Seleccionar el espesor de la superficie permeable

Generalmente las bases granulares presentan consideraciones técnicas de gradación de diámetros de grava de 13 mm y suele contemplar espesores entre 25 mm y 50 mm. La subbase se conforma de agregado con diámetros comprendidos entre 20 mm y 75 mm y un espesor de 15 cm, que garantiza la funcionalidad firme desde el punto de vista estructural.

Cuando se trata de superficies articuladas, [20], recomienda superficies de rodadura con espesores de 130 m. En cuanto al espesor subbase, este se establece mediante el resultado CBR y según la condición de infiltración, es decir, si el requerimiento es completo o parcial. La subbase comprende un espesor de capa entre 250 mm y 450 mm con filtración al terreno inferior y un CBR % mayor a 5. Cuando se trata de limitar la filtración al terreno



subyacente, la capa debe cumplir el requerimiento de un CBR % mayor a 5, para aplicar capas con espesores entre 400 y 600 mm.

De forma adicional y para mejorar el rendimiento de la estructura permeable, se instala un geotextil o geo sintético con el fin de dar una mejor estabilización del pavimento.[20]

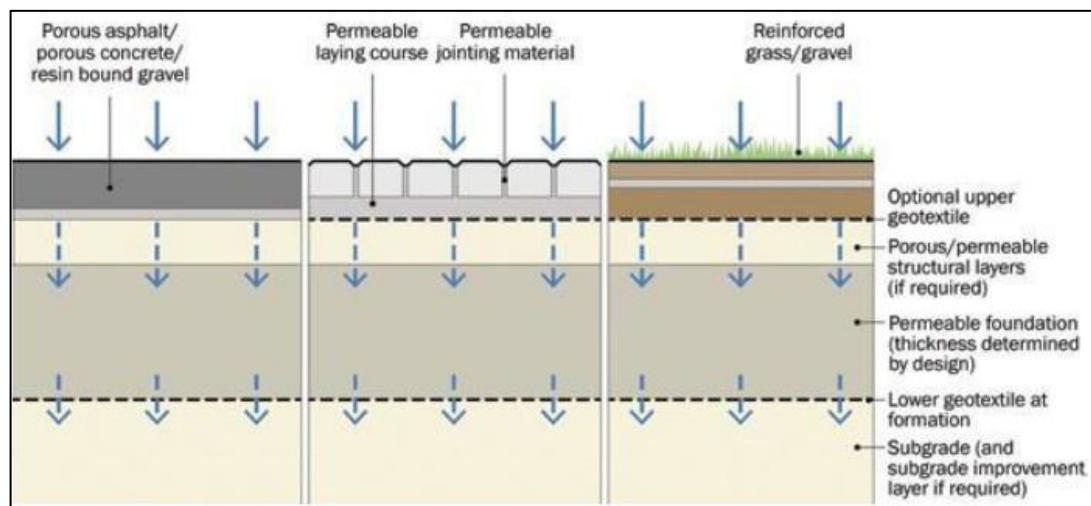
7.1.9. Gestión de la escorrentía

En la gestión de la escorrentía se presenta tres tipos de sistemas de drenaje cuyo almacenamiento temporal se define con infiltración total o parcial.

En la Ilustración 1, se evidencia la estructura de pavimento con asfalto poroso, articulado y con empuadizado, con un comportamiento de capa granular que permite que el 100% del fluido filtrado, llegue a al suelo de fundación.(CIRIA, 2015, Pervious pavements.pág 386)

Sin embargo, para esta condición de filtración, es conveniente contemplar elementos de desbordamiento de emergencia que permitan reducir la tasa de infiltración, en virtud de garantizar la vida útil de la estructura.

Ilustración 1 Tipos de sistemas de pavimento permeables: Tipo A - infiltración total

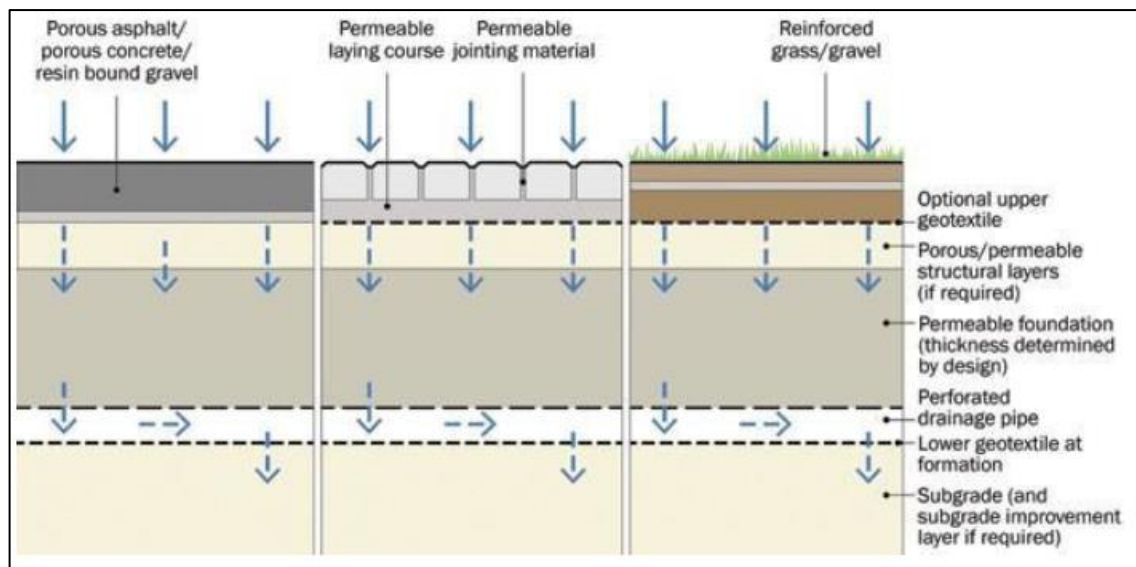


Fuente: (CIRIA, 2015, Pervious pavements. 20.9 Structural design (pavement engineering).pág 386)



En la Ilustración 2, se observa el segundo sistema, que corresponde a una configuración en la que la proporción de escorrentía que excede la capacidad de infiltración del subsuelo fluye hacia los elementos receptores mediante drenaje directo o tubos perforados dentro o debajo de ella.(CIRIA, 2015, Pervious pavements)

Ilustración 2 Tipos de sistemas de pavimento permeables: Tipo B - infiltración parcial

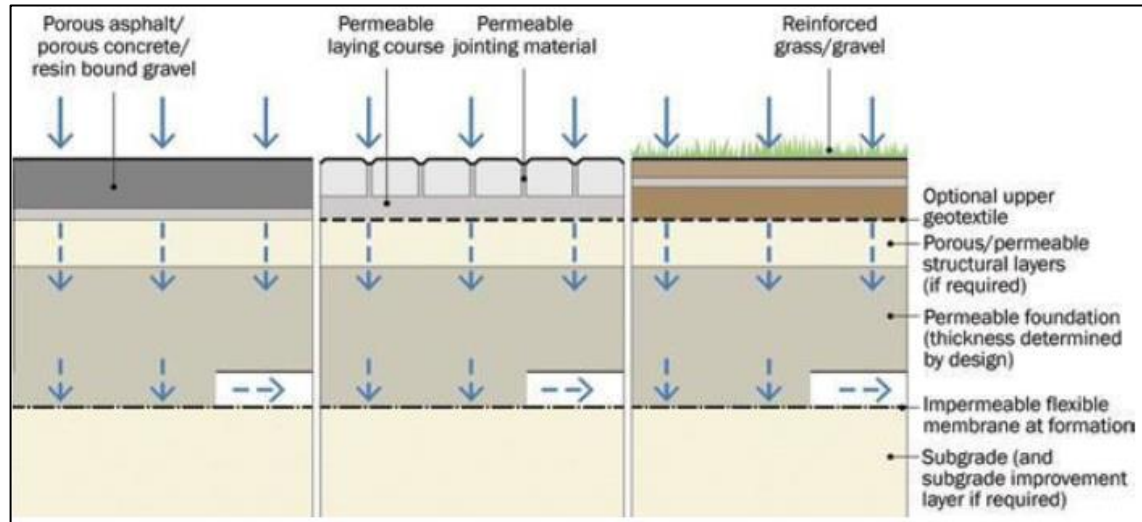


Fuente: (CIRIA, 2015, Pervious pavements. 20.9 Structural design (pavement engineering).pág 386)

En la Ilustración 3, se contempla un drenaje sin infiltración al suelo de fundación. Este sistema se caracteriza por contar una membrana impermeable (Geotextil o geomembrana), que se instala al nivel de la formación. Cuando se presenta el drenaje, las tuberías perforadas o elementos de captación, se encargan de transportar el 100 % de la escorrentía. Es sistema es ideal utilizarlo cuando los suelos presentan una baja permeabilidad o resistencia y son susceptibles a daños por la saturación. Cuando se requiera de un tratamiento particular del agua captada. Cuando el nivel freático es muy superficial y se encuentra a menos de 1.00 m de profundidad con relación a la capa subbase.(CIRIA, 2015,pervious pavements)



Ilustración 3 Tipos de sistemas de pavimento permeables: Tipo C - sin infiltración



Fuente (CIRIA, 2015, Pervious pavements. 20.9 Structural design (pavement engineering).pág 386)

7.1.10. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) son elementos que integran un sistema de drenaje alternativo para zonas urbanísticas, cuya finalidad busca mitigar los problemas de represamiento de aguas lluvias que suelen presentarse en las superficies de rodadura. Adicionalmente, estos sistemas aportan a la reducción material residual presente en la escorrentía.[31]

En comparación con los sistemas convencionales de captación y conducción de alcantarillado pluvial, los SUDS presentan una mayor cobertura de captación y, por ende, minimizan los riesgos de inundaciones en los casos de fuertes precipitaciones.[31]

El valor agregado de este tipo de alternativas hidráulicas se refleja en bajos costes económico y el aporte al mobiliario y paisaje urbano. [31]

Los SUDS son elementos que integran un sistema de drenaje alternativo para zonas urbanísticas, cuya finalidad busca mitigar los problemas de represamiento de aguas lluvias



que suelen presentarse en las superficies de rodadura. Adicionalmente, estos sistemas aportan a la reducción material residual presente en la escorrentía.

En comparación con los sistemas convencionales de captación y conducción de alcantarillado pluvial, los SUDS presentan una mayor cobertura de captación y, por ende, minimizan los riesgos de inundaciones en los casos de fuertes precipitaciones.

El valor agregado de este tipo de alternativas hidráulicas se refleja en bajos costes económico y el aporte al mobiliario y paisaje urbano.

Los SUDS tienen como principal medida reducir la escorrentía superficial, tratando la problemática de superficies impermeables de la ciudad y dividiendo las cuencas vertientes para evitar la concentración de grandes volúmenes de agua en un punto. Con este objetivo se debe procurar drenar hacia zonas verdes, parques y espacios abiertos. También es recomendable recoger en lo posible las aguas pluviales y reutilizarlas para el riego o el lavado de calles, obteniendo de este modo un doble beneficio al disminuir la cantidad de escorrentía superficial y al mismo tiempo ahorrar un consumo de agua potable (MINVU-DICTUC, 1996). [32]

Las ventajas que ofrece este sistema son sin duda, los beneficios ambientales en la captación de agua lluvia y la minimización del impacto negativo que surge de la escorrentía de aguas superficiales en zonas urbanizadas.

Las oportunidades de mejora que se han logrado evidenciar con la implementación de esta tecnología parte de la cuantificación de la escorrentía y la reducción de la velocidad de esta en la superficie para gestionar el riego de inundación aguas abajo y mitigar la contaminación a lo largo del recorrido de esta por la superficie. De igual manera, estos procesos llevan al almacenamiento del líquido y la cuantificación de la tasa de infiltración y volúmenes naturales de escorrentía. En conclusión y con base en lo descrito, se infiere que el modelo de implementación de los SUDS es modelo que permite imitar procesos hidrológicos naturales.[18]



La conductividad hidráulica de un suelo o capa de pavimentos es una propiedad del material que controla el comportamiento mecánico del suelo en función de la capacidad de permitir la filtración de un fluido, que por lo general es agua, y que atraviesa la estructura del material, a lo cual se hace completamente relevante identificar el coeficiente de permeabilidad, dado que esta información logra determinar la calidad del drenaje de la capa de pavimento.[33]

7.1.11. Software Soil Water Characteristics

El software: SOIL WATER CHARACTERISTICS, se elaborado a partir de la investigación titulada: “Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions”[34], donde se considera la evaluación del agua del suelo en la filtración, la conductividad, el almacenamiento y las relaciones planta-agua.

Con el fin de definir las condiciones hidrológicas del suelo, se tienen en cuenta las características del suelo (textura y estructura), y la materia orgánica (MO), para hallar la conductividad hidráulica y potencial hídrico del suelo, mediante correlaciones estadísticas que logren proporcionar estimaciones lo suficientemente precisas para análisis y toma de decisiones.

Con este estudio, se proponen nuevas ecuaciones para hallar características hídricas con base a los registros de suelos de USDA, donde se contempla únicamente las variables textura del suelo y materia orgánica, en vista, de su fácil acceso.

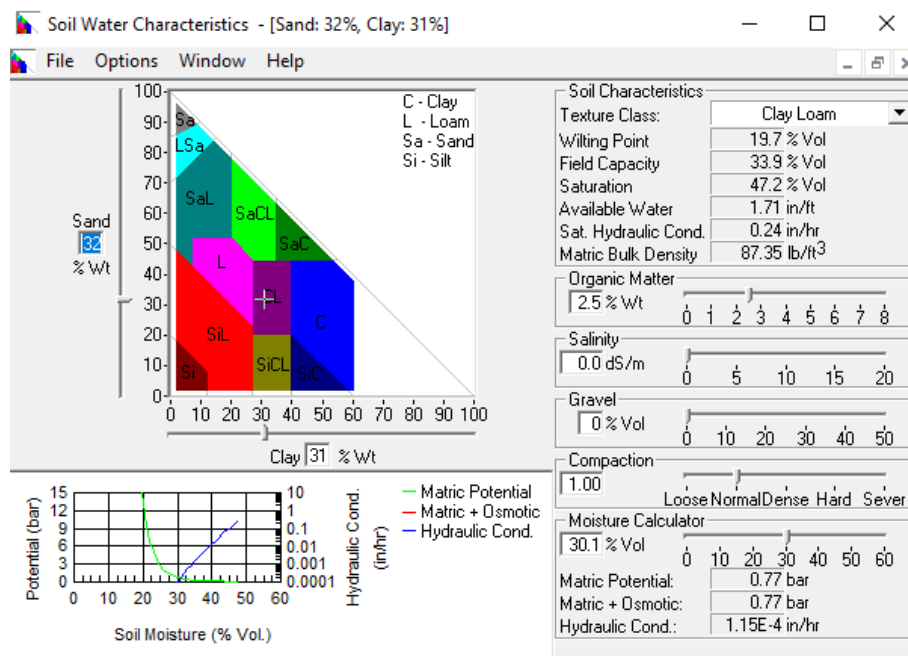
En cuanto a los objetivos de la investigación, se considera relevante: 1. La actualización de las ecuaciones que evalúan las propiedades hídricas en el suelo del autor Saxton et al. (1986). 2. Integrar la ecuación actualizada de Rawls et al. (1998), en referencia a la conductividad hidráulica y 3. Realizar combinación con las propiedades de densidad aparente, el porcentaje de grava y salinidad.



Se toma muestras de horizontes A, B y C, bajo condiciones de tensión definidas, densidad aparente, tamaño de partículas de arena, limo, arcilla y materia orgánica, cuyos resultados sirven de insumo para dar cumplimiento a los objetivos descritos. Posteriormente, se realiza correlación de los datos obtenidos de las nuevas ecuaciones con información histórica de los suelos más relevantes para verificar su capacidad de aplicación en el campo.

Con las ecuaciones se construye un modelo de interfaz gráfica que evalúa de forma dinámica las variables, proporcionando cálculos y visualizaciones rápidas de las propiedades hidrológicas del suelo.

Ilustración 4 Programa Soil Water Characteristics



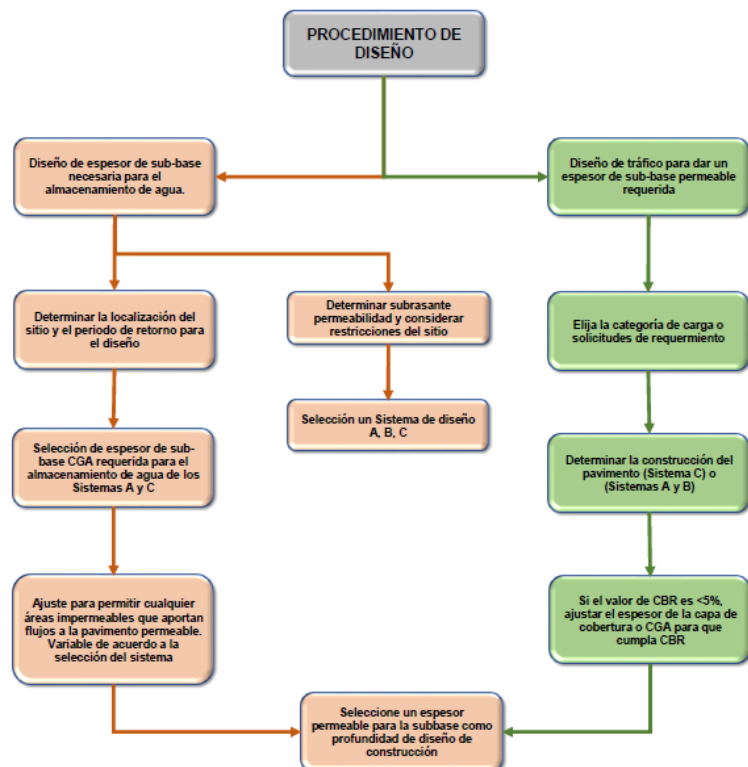
Fuente: (Soil Water Characteristic - Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions)

8. MARCO CONCEPTUAL

Los conceptos técnicos que se relacionan permiten contextualizar la investigación desde una perspectiva académica y experimental del estudio de las propiedades hidráulicas de las capas sub-base permeables. Estos resultados se utilizan para la construcción de pavimentos que, además de, contar con propiedades de resistencia de carga, permiten la gestión del agua superficial mediante un drenaje eficaz de la escorrentía que sirve de mantenimiento preventivo a la capa de rodadura.

El siguiente diagrama, considera el procedimiento de evaluación de variables y recomendaciones para el diseño de una sub-base permeable. El procedimiento se contempla en los manuales de diseño internacional de pavimento permeable.

Ilustración 5 Diseño de pavimento permeable en bloque de concreto



Fuente: (permeable pavements; Guide to the design. construction and maintenance of concrete block permeable pavements, INTERPAVE)

A continuación, se relaciona las definiciones de los conceptos técnicos utilizados a lo largo de la investigación

8.1. Agregado Grueso

Agregado: Material granular relativamente inerte, como arena, grava, roca triturada utilizado en la industria de la construcción. El agregado fino pasa por el tamiz de 4.75 mm (#4). El agregado grueso queda retenido en el tamiz de 4.75 mm (#4).



El tamaño del agregado depende directamente del sistema de clasificación, el cual presenta tamices límite para definir agregado fino y grueso. Algunos sistemas de clasificación son: MIT, USDA, ASSTHO, USCS. [35]

8.2. Concreto Poroso

El concreto poroso concreto permeable o “previous concrete” (nombre original en inglés) es una estructura compuesta de cemento, agregado grueso, agua y aditivos, cuya mezcla sirve para la fabricación de pisos y pavimentos permeables, es decir, estructuras que tienen la capacidad de filtrar el paso de agua a través de ellos. [36]

Estos concretos, a diferencia de los concretos convencionales, la presencia de finos es escasa, lo cual genera que, la presencia de vacíos sea mucho mayor y, por lo tanto, se presenta filtración del fluido.

Entre las ventajas más representativas está, retención de agua, reducción de escorrentía, compatibilidad con sistemas de alcantarillados de menor capacidad, reducción del fenómeno de hidropneumático, tracción con neumáticos de vehículos, entre otros. [37]

8.3. Conductividad Hidráulica

También se le conoce como conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad, es la velocidad de descarga de agua en condiciones de flujo laminar a través de un área transversal unitaria de un medio poroso bajo un gradiente hidráulico unitario y en condiciones estándar de temperatura, normalmente 20°C. Dada la velocidad de flujo en un material y el gradiente hidráulico el coeficiente de conductividad hidráulica está dado por la expresión: $k = v/i$. [38]



8.4. Elementos Finitos

El método de elementos finitos (MEF) consiste en la división del problema en un número finito de partes llamados elementos, en donde a menor tamaño de los elementos se permitirá conseguir cualquier forma del componente a partir de esta geometría, es por esto por lo que se le da nombre a este método ya que, al elegir un tamaño de bloque determinado, siempre se encontrara una cantidad finita de elementos que den forma a un componente mayor.

Se evalúa el comportamiento de los elementos por medio de un numero finito de parámetros asociados a puntos característicos que se denominan nodos los cuales hacen referencia a los puntos de unión de cada elemento con los elementos contiguos.

Este método brinda una ventaja significativa que es permitir la evaluación de bloques como un medio continuo, en donde la precisión de los resultados dependerá del tamaño y la forma de los elementos en que se discretice el bloque.

Los resultados de este método se presentan generalmente por medio de graficas junto con una escala de colores, en donde cada color representa un valor numérico. [39]

8.5. Energías De Compactación

Las energías de compactación es otro de los factores a evaluar dentro de los procesos de modelación preliminar, donde se estiman diferentes energías que propiciarán valores de humedad y densidad en cada muestra de ensayo realizada.

La energía de compactación está relacionada con los valores de humedad óptima y densidad seca máxima. Mediante la ejecución de ensayos, se ha evidenciado que los valores de la densidad seca máxima se incrementan en función del aumento de energías de compactación hasta 28,6 Kg-cm/cm³ (58 golpes), a partir de esta energía, los valores decrecen.

De igual modo, la relación comportamental entre Los valores contenido de humedad óptimo y la energía aplicada, presentan un aumento, dado que, que las partículas se fracturan y disgregan, el valor mínimo se obtiene con la energía de compactación.

Al graficar los valores de densidad seca máxima y los valores de humedad óptima, se puede establecer una coordenada que establece la condición ideal del material para una compactación definida.

Por lo general y como parte del estudio técnico realizado a los suelos, los ensayos de laboratorio RELACIONES DE HUMEDAD - PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN) y CBR DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO Y SOBRE MUESTRA INALTERADA, están relacionados entre si, toda vez que, las condiciones de humedad y densidad contribuyen a determinar los valores porcentuales de capacidad portante que provienen del comparativo con el material ideal o piedra partida, todo encaminado a proporcionar datos reales del comportamiento del suelo a solicitudes de carga (tránsito) que se definen en los diseños de pavimentos.

La compactación se contempla dentro de la evaluación del software SOIL WATER C. de forma cualitativa expresada como: Suelta (suelta = 0.90), Densa (densa = 1.10), Normal (normal = 1), Hard (dura = 1.20), Several (severa = 1.3). De acuerdo con la información descrita en el sistema, se puede realizar variaciones en las compactaciones, lo que permite conocer los valores de humedad y densidad del material.

8.6. Hidroplaneo

Es un fenómeno que se presenta cuando una lámina continua de agua queda involucrada en la interacción entre los neumáticos y el pavimento, la cual genera una reducción de la fricción disponible. Esta situación genera un deslizamiento incontrolado del vehículo sobre la superficie húmeda.



El hidroplaneo involucra una gran cantidad de factores. El espesor de la película de agua es un factor controlable a partir del diseño y construcción del pavimento. Existen otros factores secundarios que intervienen dentro del hidroplaneo, como el comportamiento del conductor, la presión de inflado, el labrado de los neumáticos y la intensidad de las lluvias son claramente factores que no hacen parte de la injerencia del profesional.

El controlar la presencia de agua en la superficie de rodadura hace parte fundamental y de estudio dentro del diseño de pavimentos.

8.7. Permeabilidad

Es la capacidad de una roca o de un suelo de permitir el paso de un fluido a través suyo. Medida de la relativa facilidad en que un fluido pasa a través de un material bajo una diferencia de presión dada. La permeabilidad es una característica del material, independiente de las propiedades físicas del fluido que pasa a través suyo, y es diferente del coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica. La permeabilidad de un material está dada por la velocidad de descarga del fluido con el cual se hace el ensayo, v , el gradiente hidráulico, i , el peso unitario del fluido, γ_w en el caso del agua, y su viscosidad, η , de acuerdo con la ecuación: $K = v\eta/i\gamma_w$. [38]

8.8. Slide

Slide es un software de análisis de elementos finitos que se utiliza en la estabilidad de Taludes y otros desarrollos de estructuras. Slide presenta modelaciones en 2D y 3D que utiliza métodos de equilibrio límite para el cálculo de la estabilidad. Su ámbito de aplicación en minería y obra civil es diverso, permitiendo evaluar un gran número de problemáticas geotécnicas, tales como estabilidad de terraplenes, presas, taludes en excavaciones mineras o en edificaciones, efectos de cargas externas, sísmicas, eficiencia de elementos de refuerzo, etc.



En las versiones actualizadas, como en la versión 6.0, cuenta con el análisis de estabilidad de pendientes, análisis de aguas subterráneas para flujo o condiciones transitorias. Los flujos, presiones y gradientes son calculados con valores que determine el usuario, considerando también las condiciones de contorno hidráulico. El análisis de infiltración está totalmente integrado con el de estabilidad de taludes o puede ser utilizado como un módulo independiente. El software cuenta con la capacidad de análisis probabilística – se puede atribuir distribuciones estadísticas para casi todos los parámetros de entrada, como lo son las propiedades del material, propiedades de apoyo, cargas y localización de las aguas subterráneas. La probabilidad de falla/índice de confiabilidad es calculada, además ofrece una valoración objetiva de riesgos de falla asociado a un proyecto de inclinación. [40][41]

La compactación define los valores de conductividad hidráulica a lo largo del sistema, puesto que esta característica reduce el porcentaje de vacíos en pro de mejorar las condiciones mecánicas del suelo.

8.9. Tasa De Infiltración

La tasa o velocidad de infiltración es la velocidad con la que el agua penetra en el suelo a través de su superficie. Normalmente la expresamos en mm/h y su valor máximo coincide con la conductividad hidráulica del suelo saturado. [42]

8.10. Tiempo De Infiltración

Tiempo requerido y calculado durante el cual se presenta la propiedad de infiltración sobre una capa de pavimento determinado. El tiempo para drenar de una base permeable en un tramo determinado es función de su porosidad efectiva (n_e), del coeficiente de permeabilidad (k), del espesor de la capa (H_B), de la longitud resultante (LR) y de la pendiente resultante (SR) de la trayectoria de flujo. [22]



9. METODOLOGÍA

La metodología implementada para dar cumplimiento a los objetivos específicos establecidos se constituyó mediante el desarrollo de tres etapas, cuyas actividades propias investigativas permitieron el alcance de estos.

En principio se realizó una investigación acerca de las gradaciones típicas que presentan los pavimentos permeables, en diversos manuales. Lo cual permite identificar diferencias entre los requerimientos de diseño nacionales e internacionales.

Para efectos del presente documento, se elige la granulometría especificada para una sub-base permeable en la norma colombiana de INVIAS registrada en el Manual de Drenaje para Carreteras, que presenta requerimientos de diseño de capas permeables de pavimento.

Se contempla dentro del diseño, la capa de colocación y contenido de las juntas, que hacen parte de la estructura del pavimento. En donde, fue necesario realizar una consulta detallada del manual de diseño internacional INTERVAPE, en vista que, la norma colombiana no contempla este aparte dentro de su manual, en lo concerniente a pavimentos permeables.

La capa superficial de rodadura se contempla como un pavimento articulado en adoquín convencional.

La caracterización hidráulica tuvo como referente el software Soil Water Characteritics, para obtener datos iniciales de conductividad hidráulica, a partir de, las características de compactación del material, además de, utilizar las ecuaciones con las que opera el programa para correlacionar resultados y establecer conclusiones preliminares, sin embargo, se determinó que el software esta orientado a materiales de suelos con contenidos de arena, sin contemplar el porcentaje de grava. Razón por la cual, fue



necesario realizar una investigación alterna que relacionara la conductividad hidráulica en función del contenido de grava en un suelo arenoso.

Con los resultados obtenidos de conductividad hidráulica, se entra a definir las condiciones de permeabilidad que presenta el suelo, además de, conocer la clasificación del sistema unificado que se muestra en la Tabla 13.

Con base en los manuales de diseño internacional INTERPAVE y CIRIA, se establecen espesores de capa teniendo en cuenta variables de diseño como: factores de carga y el tipo de infiltración deseado para el pavimento.

Luego de definir los datos de entrada y las condiciones físicas e hidráulicas de la capa granular, además de, tener en cuenta información histórica registradas por el IDEAM mediante la gráfica de curvas IDF, se procede con la modelación en el software SLIDE para obtener parámetros y propiedades del comportamiento de las capas granulares en presencia de la infiltración de agua de escorrentía.

La modelación del pavimento consta de una simulación definida por la geometría de las capas, condiciones de permeabilidad, caudal superficial, sistema de drenaje. Mediante el desarrollo puntual de evaluación que ofrece el método de elementos finitos (MEF), que permite la evaluación del pavimento como un problema discretizado, en donde la precisión de los resultados depende del tamaño y la forma de los elementos.

Con la modelación se obtiene propiedades hidráulicas como: velocidad de infiltración, cuantificación del caudal total infiltrado.

Finalmente, se analizan resultados, se establecen conclusiones, y se presentan recomendaciones de uso acorde a los requerimientos de infiltración.

A continuación, se describen las etapas y actividades.



9.1. Etapa 1

Realizar la caracterización física e hidráulica de materiales granulares con variaciones en el grado de compactación, tamaño y distribución de las partículas en capas de pavimento permeables.

En esta etapa se realizó una investigación que permite establecer diferentes distribuciones granulométricas propias de una sub-base permeable, que sirven de insumo como dato de entrada para la modelación con el software Soil Water Characteristics con el fin de obtener valores de conductividad hidráulica.

9.1.1. Caracterización Física

Para realizar la caracterización física se consulta información de gradaciones utilizadas en capas permeables de pavimento en manuales de diseño internacional. Con estos datos y las características granulométricas que registra el Manual de Drenaje para Carreteras (INVIAS), se realiza un comparativo relacionado con el tamaño de los tamices utilizados y los rangos admisibles del porcentaje de material pasa. Se determina que los valores presentados por el Manual de INVIAS, son acordes a los materiales existentes en el país para la construcción de este tipo de estructuras. Por lo cual, se elige este manual para realizar la caracterización de la sub-base permeable.

Para capa de colocación, en vista de sus condiciones de gradación, se define mediante los manuales de diseño internacionales, dado que, no hay reglamentación colombiana para determinar las características del tamaño de las partículas para el diseño de capas en pavimentos permeables.



9.1.1.1. Granulometrías

Subbase permeable

Norma Internacional

Se realiza una investigación del manual internacional The SUDS manual, donde se identifica mediante la Tabla 8, gradaciones típicas para la construcción de pavimentos permeables.

Estas granulometrías contemplan tamaños de tamices en los tres tipos de agregado grueso utilizados, con particularidad de rangos en función del tamaño del agregado.

Tabla 8 Gradaciones típicas requeridas para agregados de Sub-base

TABLE 20.13 Typical grading requirements for sub-base aggregates (after BS 7533-13:2009 and DfT, 1998)			
Sieve size (mm)	Percent passing		
	Coarse aggregate 4–40 mm (4/40) (BS 7533-13:2009)	Coarse aggregate 4–20 mm (4/20) (BS 7533-13:2009)	Type 3 sub-base 0–40 mm (0/40) (DfT, 1998)
80	100	–	100
63	98–100	–	80–99
40	90–99	100	50–78
31.5	–	98–100	31–60
20	25–70	90–99	18–46
10	–	25–70	10–35
4	0–15	0–15	6–26
2	0–5	0–5	0–20
1	–	–	0–5

Fuente: The SUDS Manual, Sub-base aggregate characteristics. pág. 422



Normatividad Nacional

EL Instituto Nacional de Vías INVIAS [43], presenta una relación de parámetros de agregado para el diseño de pavimento permeable con base en una distribución de tamizado caracterizado por tener un bajo porcentaje de partículas finas. Estos agregados, de acuerdo con su condición, contemplan propiedades físicas de estabilidad mayores.

Tabla 9 Granulometrías típicas para bases permeables no estabilizadas

TAMIZ	PORCENTAJE QUE PASA		
	No. 1	No. 2	No. 3
1 ½" (37 mm)			95-100
1" (25 mm)		95-100	71-87
¾" (19 mm)	95-100	77-93	58-74
½" (12.5 mm)	70-86	57-73	44-60
3/8" (9.5 mm)	55-71	45-61	34-50
No. 4 (4.75 mm)	30-46	26-38	19-31
No.8 (2.36 mm)	13-25	10-22	8-16
No. 16 (1.18 mm)	0-4	0-4	0-4

Fuente: Manual de Drenaje para carreteras. Drenaje Subsuperficial. Pág. 5-41

El diseño de la capa permeable que cumpla con los rangos descritos en la tabla contempla propiedades de permeabilidad con alta capacidad de drenaje y una relación de vacíos alta, en referencia al diseño convencional de capas de pavimento.

Capa de colocación y material de juntas

El material granular de colocación y las características de las partículas, se define a partir de lo expuesto por el manual de diseño Internacional INTERPAVE [44], las consideraciones técnicas y requerimientos normativos Internacionales en referencia a la capa de colocación.

En cuanto al material en las juntas, presenta características de gradación similares a la capa de colocación, sin embargo, se recomienda que este material tenga condiciones más finas, en vista que, el material está destinado a cumplir funciones de filtro y adherencia de los adoquines.



Tabla 10 Límites típicos de distribución de tamaño de partículas para material de capa de colocación

BS Sieve size (mm)	Percentage Passing (%)
14	100
10	98-100
6.3	80-99
2.0	0-20
1.0	0-5

Fuente: INTERPAVE: Guía De Diseño, Construcción Y Mantenimiento Del Bloque Concreto De Pavimentos Permeable

Luego de conocer los valores, se procederá a simular diferentes de niveles compacidad, a la par con los valores de gradación del material, con el fin de obtener la característica de conductividad hidráulica para cada combinación.

9.1.1.2. Clasificación de suelos

Para establecer los rangos que conforma el tamaño de las partículas, se utiliza la clasificación definida por la organización Internacional AASHTO. Estos rangos permitieron establecer los valores del tamizado en mm que clasifica el agregado en grava, arena, limo y arcilla. Esta información sirvió para establecer el porcentaje de agregado presente en las granulometrías propuestas.



Tabla 11 Tabla de clasificación de suelos

Name of organization	Grain size (mm)			
	Gravel	Sand	Silt	Clay
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	>2	2 to 0.06	0.06 to 0.002	<0.002
U.S. Department of Agriculture (USDA)	>2	2 to 0.05	0.05 to 0.002	<0.002
American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)	76.2 to 2	2 to 0.075	0.075 to 0.002	<0.002
Unified Soil Classification System (U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Bureau of Reclamation, and American Society for Testing and Materials)	76.2 to 4.75	4.75 to 0.075	Fines (i.e., silts and clays) <0.075	

Note: Sieve openings of 4.75 mm are found on a U.S. No. 4 sieve; 2-mm openings on a U.S. No. 10 sieve; 0.075-mm openings on a U.S. No. 200 sieve. See Table 2.5.

Fuente: Lambe y Whitman, Mecánica de suelos - Lambe y Whitman.pdf. 2004

9.1.2. Caracterización Hidráulica

Teniendo en cuenta la variable cualitativa de compactación y la gradación del material, se realiza modelación en el Soil Water Characteritics, por medio del cual, se busca conocer la conductividad hidráulica que presenta materiales con contenido de arena, con fines de, obtener un dato inicial que permita correlacionar esta propiedad respecto al porcentaje de grava existente en el material. Para esto fue necesario realizar una consulta de artículos para conocer el comportamiento de material arenoso con relación a la presencia de grava.

9.1.2.1. Conductividad Hidráulica

Por medio del software Soil Water Characteritics se determina los valores de conductividad hidráulica para las condiciones de gradación de la capa sub-base. Además de, realizar una comprobación con los datos resultantes de las ecuaciones en las que se fundamenta el software.



A continuación, se relaciona el resume de ecuaciones para la estimación de características del suelo con presencia de agua y que se consideraron en el cálculo de la conductividad hidráulica.



Tabla 12 Definición de variables

Símbolo	Definición
θ_{1500}	1500 kPa de Tensión de humedad, %v
θ_{1500t}	1500 kPa de Tensión de humedad, primera solución, %v
θ_{33}	33 kPa de Tensión de humedad, densidad normal, %v
θ_{33t}	33 kPa Tensión de humedad, primera solución, %v
θ_{S-33}	33 kPa de Tensión de humedad de saturación, densidad normal, %v
$\theta_{(S-33)t}$	33 kPa de Tensión de humedad de saturación, primera solución, %v
θ_S	Humedad de saturación (0 kPa), densidad normal, %v
ρ_N	Densidad normal, g /cm
ρ_{DF}	Densidad ajustada, g/ [cm] ^3
DF	Factor de ajuste de la densidad por compactación (0,9 -1,3) Donde: 0,9 = Suelos suelto; 1,00 = Normal; 1,1 = Denso; 1.2 = Duro; 1.3 = Rígido
θ_{S-DF}	Humedad de saturación (0 kPa), densidad ajustada, %v
θ_{33-DF}	33 kPa de Tensión de humedad, densidad ajustada, %v
$\theta_{(S-33)DF}$	33 kPa de Tensión de humedad de saturación, densidad ajustada, %v
B	Coefficiente de humedad – tensión
K_S	Conductividad saturada (matriz de suelo), mm/h
λ	Pendiente de la curva logarítmica tensión-humedad
R_V	Fracción de volumen de grava (decimal), g/cm ³
α	Densidad de la matriz de suelo/densidad de la grava (2,65) = $\rho/2,65$
R_W	Fracción de peso de grava (decimal), g/g
ρ_B	Densidad del suelo grueso, g/ [cm] ^3
K_b	Conductividad saturada (suelo grueso), mm/h

Fuente Soil Water Characteristics-Paper

Ecuaciones para estimaciones de características de agua en el suelo. [34]²

Ecuación 3. 1500 kPa de humedad, %v

$\theta_{1500} = \theta_{1500t} + (0,14 * \theta_{1500t} - 0,02)$	
Descripción	θ_{1500} = 1500 kPa de Tensión humedad, %v

Fuente Soil Water Characteristics-Paper

² Fuente (Soil Water Characteristics-Paper)



Ecuación 4. 1500 kPa de humedad, primera solución, %v

$\theta_{1500t} = -0,024S + 0,487C + 0,0060M + 0,005(S * OM) - 0,013(C * OM) + 0,068(S * C) + 0,031$	
Descripción	$\theta_{1500t} = 1500 \text{ kPa de humedad, primera solución, \%v}$

Fuente: Soil Water Characteristics-Paper

Ecuación 5. 33 kPa de humedad, densidad normal, %v

$\theta_{33} = \theta_{33t} + [1,283(\theta_{33t})^2 - 0,374(\theta_{33t}) - 0,015]$	
Descripción	$\theta_{33} = 33 \text{ kPa de humedad, densidad normal, \%v}$

Fuente: Soil Water Characteristics-Paper

Ecuación 6. 33 kPa de humedad, primera solución, %v

$\theta_{33t} = -0,251S + 0,195C + 0,0110M + 0,006(S * OM) - 0,027(C * OM) + 0,452(S * C) + 0,299$	
Descripción	$\theta_{33t} = 33 \text{ kPa de humedad, primera solución, \%v}$

Fuente: Soil Water Characteristics-Paper

Ecuación 7. 33 kPa de humedad de saturación, densidad normal, %v

$\theta_{S-33} = \theta_{(S-33)t} + (0,636\theta_{(S-33)t} - 0,107)$	
Descripción	$\theta_{S-33} = 33 \text{ kPa de humedad de saturación, densidad normal, \%v}$

Fuente: Soil Water Characteristics-Paper

Ecuación 8. 33 kPa de humedad de saturación, primera solución, %v

$\theta_{(S-33)t} = 0,278S + 0,034C + 0,0220M - 0,018(S * OM) - 0,027(C * OM) - 0,584(S * C) + 0,078$	
Descripción	$\theta_{(S-33)t} = 33 \text{ kPa de humedad de saturación, primera solución, \%v}$

Fuente: Soil Water Characteristics-Paper

Ecuación 9. Humedad de saturación (0 kPa), densidad normal, %v

$\theta_S = \theta_{33} + \theta_{(S-33)} - 0,097S + 0,043$	
Descripción	$\theta_S = \text{Humedad de saturación (0 kPa), densidad normal, \%v}$

Fuente: Soil Water Characteristics-Paper

Ecuación 10. Densidad normal, g /cm

$\rho_N = (1 - \theta_S)2,65$	
Descripción	$\rho_N = \text{Densidad normal, g /cm}$

Fuente: Soil Water Characteristics-Paper



Ecuación 11. Densidad ajustada, g/cm^3

$\rho_{DF} = \rho_N * DF$	
Descripción	ρ_{DF} = Densidad ajustada, g/cm^3 DF = Factor de ajuste de la densidad por compactación (0,9-1,3) Donde: 0,9 = Suelos suelto; 1,00 = Normal; 1,1 = Denso; 1.2 = Duro; 1.3 = Rígido

Fuente: Soil Water Characteristics-Paper

Ecuación 12. Humedad de saturación (0 kPa), densidad ajustada, %v

$\theta_{S-DF} = 1 - (\rho_{DF}/2,65)$	
Descripción	θ_{S-DF} = Humedad de saturación (0 kPa), densidad ajustada, %v

Fuente: Soil Water Characteristics-Paper

Ecuación 13. 33 kPa de humedad, densidad ajustada, %v

$\theta_{33-DF} = \theta_{33} - 0,2(\theta_S - \theta_{S-DF})$	
Descripción	θ_{33-DF} = 33 kPa de humedad, densidad ajustada, %v

Fuente: Soil Water Characteristics-Paper

Ecuación 14. 33 kPa de humedad de saturación, densidad ajustada, %v

$\theta_{(S-33)DF} = \theta_{S-DF} - \theta_{33-DF}$	
Descripción	$\theta_{(S-33)DF}$ = 33 kPa de humedad de saturación, densidad ajustada, %v

Fuente: Soil Water Characteristics-Paper

Ecuación 15. Coeficiente de humedad – tensión

$B = [\ln(1500) - \ln(33)] / [\ln(\theta_{33}) - \ln(\theta_{1500})]$	
Descripción	B = Coeficiente de humedad – tensión

Fuente: Soil Water Characteristics-Paper

Ecuación 16. Conductividad saturada (matriz de suelo), mm/h

$K_s = 1930(\theta_s - \theta_{33})^{(3-\lambda)}$	
Descripción	K_s = Conductividad saturada (matriz de suelo), mm/h

Fuente: Soil Water Characteristics-Paper



Ecuación 17. Pendiente de la curva logarítmica tensión-humedad

$\lambda = 1/B$	
Descripción	$\lambda = \text{Pendiente de la curva logarítmica tensión-humedad}$

Fuente: Soil Water Characteristics-Paper

Ecuación 18. Fracción de volumen de grava (decimal), g/ [cm] ^3

$R_v = (\alpha R_w) / [1 - R_w(1 - \alpha)]$	
Descripción	$R_v = \text{Fracción de volumen de grava (decimal), g/cm}^3$ $\alpha = \text{Densidad de la matriz de suelo/densidad de la grava (2,65) = } \rho/2,65$ $R_w = \text{Fracción de peso de grava (decimal), g/g}$

Fuente: Soil Water Characteristics-Paper

Ecuación 19. Densidad del suelo grueso, g/ [cm] ^3

$\rho_B = \rho_N(1 - R_v) + (R_v * 2,65)$	
Descripción	$\rho_B = \text{Densidad del suelo grueso, g/ [cm]}^3$ $R_v = \text{Fracción de volumen de grava (decimal), g/cm}^3$ $\alpha = \text{Densidad de la matriz de suelo/densidad de la grava (2,65) = } \rho/2,65$ $R_w = \text{Fracción de peso de grava (decimal), g/g}$

Fuente: Soil Water Characteristics-Paper

Ecuación 20. Conductividad saturada (suelo grueso), mm

$K_b/K_s = \frac{1 - R_w}{[1 - R_w(1 - 3\alpha/2)]}$	
Descripción	$K_b = \text{Conductividad saturada (suelo grueso), mm/h}$ $\alpha = \text{Densidad de la matriz de suelo/densidad de la grava (2,65) = } \rho/2,65$ $R_w = \text{Fracción de peso de grava (decimal), g/g}$

Fuente: Soil Water Characteristics-Paper

9.1.3. Clasificación de la permeabilidad del suelo según INVIAS

De acuerdo con la información obtenida de Tabla 13 de INVIAS, se considera la clasificación del suelo y su condición de permeabilidad en función del coeficiente de conductividad



hidráulica. Con el valor de conductividad, se identifica la calidad del material y la permeabilidad relativa.

Tabla 13 Relación aproximada entre la clasificación unificada y la permeabilidad

CLASIFICACIÓN SEGÚN SISTEMA UNIFICADO	PERMEABILIDAD RELATIVA	COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD - k (CM/S)	
GW	PERMEABLE	1,E-03	1,E-01
GP	PERMEABLE A MUY PERMEABLE	5,E-03	10
GM	SEMIPERMEABLE	1,E-07	1,E-02
GC	IMPERMEABLE	1,E-08	1,E-05
SW	PERMEABLE	5,E-04	5,E-02
SP	SEMIPERMEABLE A PERMEABLE	5,E-05	5,E-04
SM	IMPERMEABLE	5,E-07	5,E-04
SC	SEMIPERMEABLE	5,E-08	5,E-04
ML	IMPERMEABLE	5,E-08	5,E-04
CL	IMPERMEABLE	5,E-08	5,E-06
OL	IMPERMEABLE	5,E-08	5,E-05
MH	IMPERMEABLE	5,E-09	5,E-07
CH	MUY IMPERMEABLE	5,E-10	5,E-08

Fuente Manual de Drenaje de Carreteras INVIAS

9.2. Etapa 2

Etapa 2: Modelar el flujo con análisis de elementos finitos por medio de SLIDE, en el que se evidencie el comportamiento filtrante a través de las capas de pavimento.

Los resultados obtenidos de la etapa 1, se tomarán como datos de entrada en la modelación con elementos finitos en el software SLIDE para evaluar el comportamiento del fluido a lo largo de la estructura de pavimento en los diversos escenarios presentados (curvas IDF), con el fin de encontrar la velocidad de infiltración y cuantificar el caudal total filtrado.

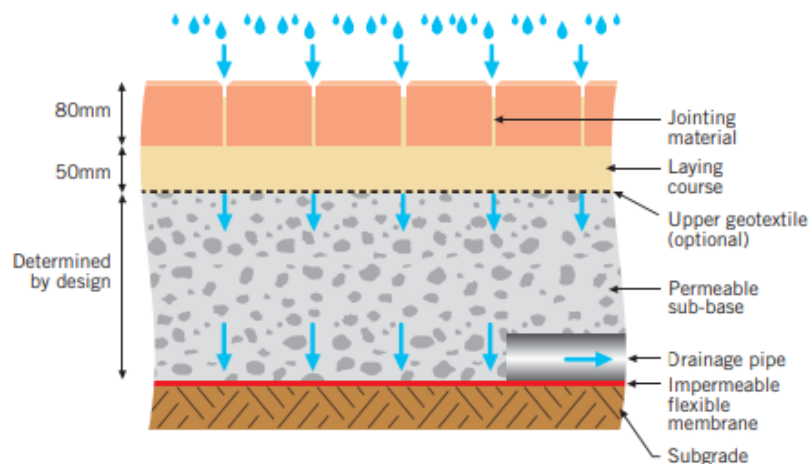


9.2.1. Espesores de INTERPAVE (diseño)

Por medio de la guía de diseño del manual de diseño internacional, construcción y mantenimiento de pavimento en bloques de concreto[19], se estableció el sistema de pavimento permeable a usar en el presente trabajo y sus respectivos espesores de capa, el cual será un sistema de No infiltración

Ilustración 6, lo que hace referencia a que este sistema permite la captura completa del agua filtrada usando una membrana impermeable sobre la subrasante lo que permite dirigir el agua almacenada dentro del pavimento para su posterior descarga de manera progresiva por medio de tuberías de salida hacia los sistemas de recolección.

Ilustración 6 Sistema no infiltración



Fuente INTERPAVE, Relación de espesores

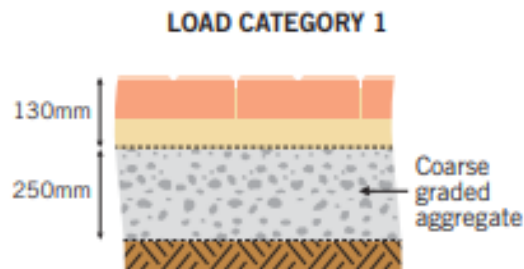


Tabla 14 Categorías de carga

1 DOMESTIC PARKING	2 CAR	3 PEDESTRIAN	4 SHOPPING	5 COMMERCIAL	6 HEAVY TRAFFIC
No Large Goods Vehicles	Emergency Large Goods Vehicles only	One Large Goods Vehicle per week	Ten large Goods Vehicles per week	100 Large Goods Vehicles per week	1000 large Goods Vehicles per week
Zero standard axles	100 standard axles	0.015msa	0.15msa	1.5msa	15msa
Patio	Car parking bays and aisles	Town/city pedestrian street	Retail development delivery access route	Industrial premises	Main road
Private drive	Railway station platform	Nursery access	School/ college access road	Lightly trafficked public road	Distribution centre
Decorative feature	External car showroom	Parking area to residential development	Office block delivery route	Light industrial development	Bus station (bus every 5 minutes)
Enclosed playground	Sports stadium pedestrian route	Garden centre external display area	Deliveries to small residential development	Mixed retail/ industrial development	Motorway Truck Stop
Footway with zero vehicle overrun	Footway with occasional overrun	Cemetery Crematorium	Garden centre delivery route	Town square	Bus stop
	Private drive/ footway crossover	Motel parking	Fire station yard	Footway with regular overrun	Roundabout
		Airport car park with no bus pickup	Airport car park with bus to terminal	Airport landside roads	Bus lane
		Sports centre	Sports stadium access route/ forecourt		

Fuente: INTERPAVE – Categorías de carga

Ilustración 7 Espesores para categoría de carga 1



Fuente: INTERPAVE - Espesores para categoría de carga 1

Por medio de la Tabla 14, se define el espesor que se ajusta al pavimento permeable, que se define por medio de una categoría de carga a la que estará expuesto el pavimento que se precisó como categoría 1 Parquadero doméstico, en el que se tiene un espesor de 250 mm de sub-base permeable además de los valores ya definidos de espesor del adoquín que se toma como 80 mm y la capa de colocación de 50 mm.

9.2.2. Curvas IDF

Las curvas IDF entregan un valor de insumo de precipitación, con el cual, se logra definir un caudal a infiltrar por medio de la sub-base.

Se consulta la base de datos del IDEAM para elegir el gráfico más propicio para la modelación y, cuya estación de monitoreo presentara información actualizada, además de, contemplar una localización de características similares a la capital.



9.2.3. Slide (variables de entrada, datos de salida (resultados de entrega). Revisión de ecuaciones y variables en ecuaciones)

En la modelación con el software Slide se desarrolló el siguiente procedimiento para hallar datos del comportamiento del fluido dentro la capa sub-base.

- En primer lugar, se establece la geometría del pavimento y la tubería, por medio de la inserción de contornos de material.
- Después de esto, se determina la condición de análisis, además de los parámetros de conductividad para cada capa.
- En tercer lugar, se establecen las condiciones de borde requeridas en cada contorno.
- A continuación, se definen las secciones de drenaje que se quieren evaluar y el valor de infiltración vertical para la estructura (intensidad de precipitación).
- Se procede a realizar el compute del pavimento modelado y después que el programa realice las interacciones establecidas se obtiene resultados de presión de poros, gradiente hidráulico, velocidad y caudal de infiltración.

9.3. Etapa 3

Etapa 3: Determinar la eficiencia de drenaje de la capa granular en función de distintos niveles de precipitación (intensidad de la lluvia y tiempo).

Los resultados de la modelación permitirán establecer porcentajes de eficiencia drenante con base en la capacidad que ofrece el pavimento de filtrar el caudal de demanda en los diversos niveles de precipitación.

En esta etapa se consolidada la información, se analizan los resultados, se establecen conclusiones, y se presentan recomendaciones de uso acorde a los requerimientos de infiltración.



En los resultados se presenta los datos entregados por la modelación de la sub-base, información concerniente a porcentaje de eficiencia drenante con tiempos de duración en 10 y 60 minutos, información y análisis de caudal en la capa de rodadura y caudal infiltrado.

Se realiza comparativo de resultados en los tres tipos de sub-base, bajo las propiedades de conductividad, compactación, en función de la duración del evento.

Se realiza análisis y comparativo de resultados en velocidad, tiempo, caudal de infiltración, además de, la eficiencia de la sub-base, lo cual permite determinar las condiciones más favorables de infiltración en pro de optimizar la implementación de este tipo de estructuras.



10. ALCANCE Y LIMITACIONES

En el proyecto se busca generar un análisis técnico referente a la condición física de las capas granulares en función de la conductividad hidráulica, la gradación y distribución de las partículas.

La parte experimental y la realización de ensayos de laboratorio queda excluida del objeto de la investigación, por contingencia sanitaria y directriz emitida por administración de la Universidad.

Dentro de este proyecto no se tendrá en cuenta el análisis del comportamiento mecánico de las capas granulares, por lo que se hará énfasis, en analizar estructuras de pavimento con diseño de cargas exclusivo para bajo tráfico, como el peatonal, lo que infiere en una baja resistencia, dadas las condiciones técnicas en mención.

La investigación hará énfasis en analizar la condición hidráulica de la capa de pavimento para determinar propiedades de eficiencia drenante, velocidad de descarga y caudal de infiltración.

El documento investigativo está orientado a estudiantes y profesionales del área pavimentos que estén interesados en profundizar en el estudio del comportamiento de capas de pavimento permeable.

Promover la implementación de este tipo de tecnologías de diseño de pavimento con reconocimiento de beneficios alternativos al sistema de drenaje convencional, mostrando las ventajas que ofrece el sistema en la optimización de drenaje de escorrentía.



11. RESULTADOS Y ANÁLISIS

11.1. Resultados

Posterior a los procesos de estimación de valores de entrada como las condiciones técnicas que entrega el Manual de Diseño de pavimentos permeables del INVIAS, la información de geometría transversal de la reglamentación internacional y conductividad hidráulica, se ejecuta la modelación con el Software SLIDE para identificar las propiedades hidráulicas de la estructura de pavimento, además de, evaluar la eficiencia del sistema respecto a la presencia de un caudal definido en la capa de rodadura.

El análisis de resultados contempla al detalle las características técnicas de la granulometría admisible para la construcción del pavimento, las dimensiones de la capa de rodadura, colocación y sub-base, las características de conductividad hidráulica del pavimento, la incidencia de la intensidad, duración y frecuencia de los periodos de lluvias, los resultados y observaciones de la modelación SLIDE y resultados adicionales que contempla la evaluación.

11.1.1. Caracterización Física

11.1.1.1. Granulometrías

Sub-base Permeable

Para definir la gradación que constituye la sub-base granular en el pavimento permeable, se utilizaron los rangos descritos en la Tabla 9 del Manual de Drenaje de Carreteras de INVIAS.

En cuanto a la granulometría propuesta, se toman valores aleatorios que oscilen entre los rangos definido en cada tipo de granulometría de la Tabla 9. Para proponer un tipo de suelo para cada una de las Granulometrías típicas para bases permeables no estabilizadas.

Los resultados obtenidos para la granulometría de la sub-base tipo I, están relacionados en la Tabla 15 y la Gráfica 1. Los rangos utilizados se tomaron la Tabla 9, en la columna 2.

Tabla 15 Granulometría # 1 para sub-base permeable no estabilizada

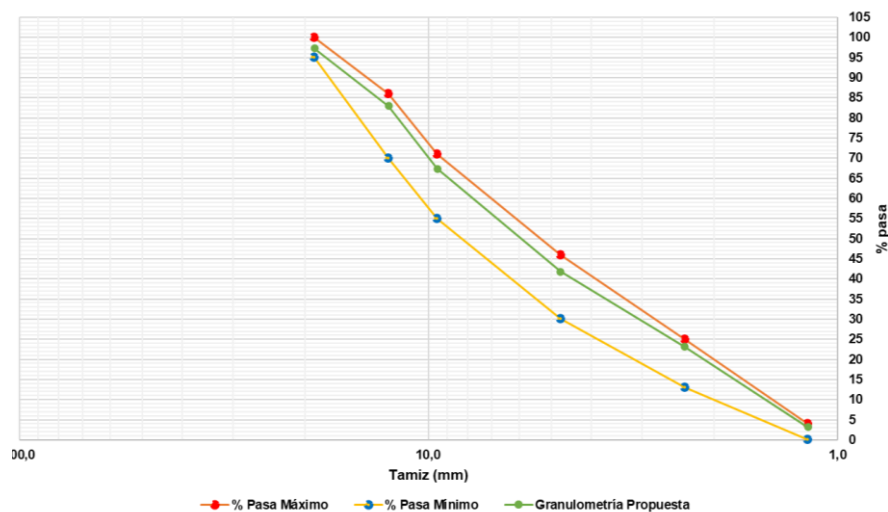
Granulometría # 1 para sub-base permeable no estabilizada

Tamiz (mm)	19,0	12,5	9,5	4,8	2,4	1,2
Tamiz	3/4	1/2	3/8	4	8	16
% Pasa Máximo	100	86	71	46	25	4
% Pasa Mínimo	95	70	55	30	13	0
Granulometría Propuesta	97,3	83	67,4	41,8	23,1	3,2

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 1 Granulometría # 1 para sub-base permeable no estabilizada

Granulometría # 1 para sub-base permeable no estabilizada



Fuente: Elaboración Propia

Para establecer la granulometría de la sub-base tipo 2, se usaron rangos de la columna 3 en la Tabla 9, que se muestran en la Tabla 16 y Gráfica 2.

Tabla 16 Granulometría # 2 para sub-base permeable no estabilizada

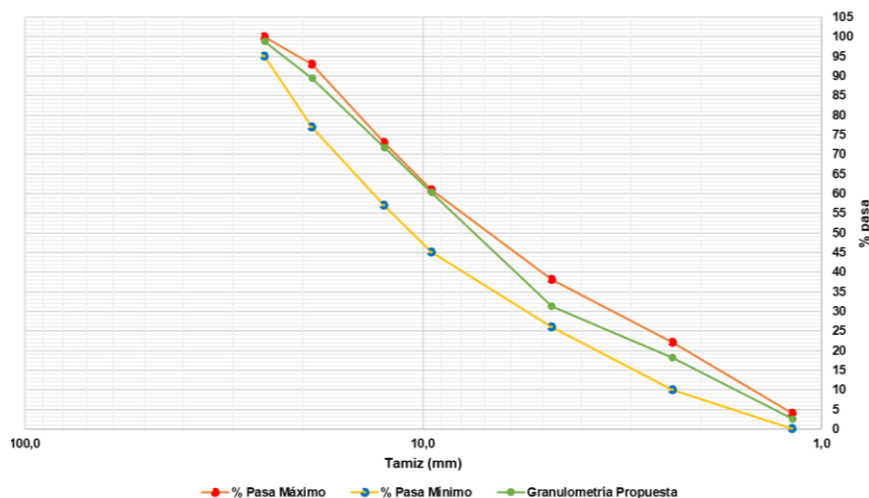
Granulometría # 2 para sub-base permeable no estabilizada

Tamiz (mm)	25,0	19,0	12,5	9,5	4,8	2,4	1,2
Tamiz	1	3/4	1/2	3/8	4	8	16
% Pasa Máximo	100	93	73	61	38	22	4
% Pasa Mínimo	95	77	57	45	26	10	0
Granulometría Propuesta	98,8	89,5	71,8	60,3	31,3	18,2	2,6

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 2 Granulometría # 2 para sub-base permeable no estabilizada

Granulometría # 2 para sub-base permeable no estabilizada



Fuente: Elaboración Propia

Para establecer la granulometría de la sub-base tipo 3, se usaron rangos de la columna 4 en la Tabla 9, que se muestran en la Tabla 17 y Gráfica 3.

Tabla 17 Granulometría # 3 para sub-base permeable no estabilizada

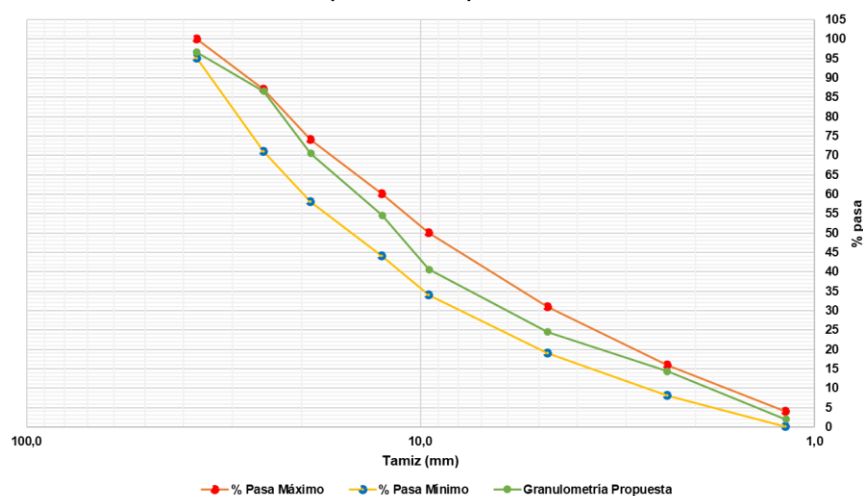
Granulometría # 3 para sub-base permeable no estabilizada

Tamiz (mm)	37,0	25,0	19,0	12,5	9,5	4,8	2,4	1,2
Tamiz	1 1/2	1	3/4	1/2	3/8	4	8	16
% Pasa Máximo	100	87	74	60	50	31	16	4
% Pasa Mínimo	95	71	58	44	34	19	8	0
Granulometría Propuesta	96,6	86,6	70,5	54,6	40,6	24,5	14,3	2

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3 Granulometría # 3 para sub-base permeable no estabilizada

Granulometría # 3 para sub-base permeable no estabilizada



Fuente: Elaboración Propia

Capa de colocación y material de juntas

En cuanto a la capa de colocación y juntas, se propusieron granulometrías que cumplieran con los rangos admisibles de porcentaje que pasa en tamices de 1 a 14 mm como lo muestra la Tabla 10 de la guía de diseño, construcción y mantenimiento de pavimento en bloques de concreto [19].

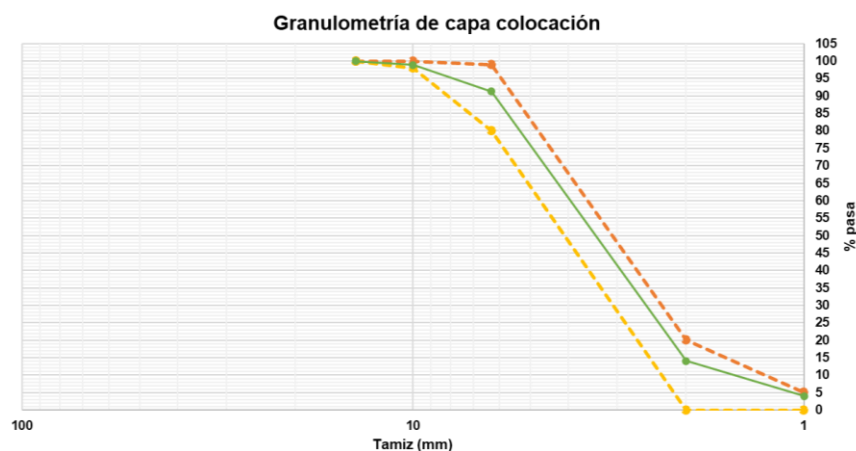


Tabla 18 Granulometría de capa colocación

Granulometría de capa colocación					
Tamiz (mm)	14	10	6,3	2	1
Tamiz	1/2"	3/8"	1/4"	10	14
Máxima	100	100	99	20	5
Mínima	100	98	80	0	0
Granulometría Propuesta	100,00	98,83	91,30	14,04	4,07

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4 Granulometría de la capa de Colocación



Fuente: Elaboración Propia

Material de juntas

Para las juntas, se propone la granulometría que se relaciona en la Tabla 19 y Gráfica 5

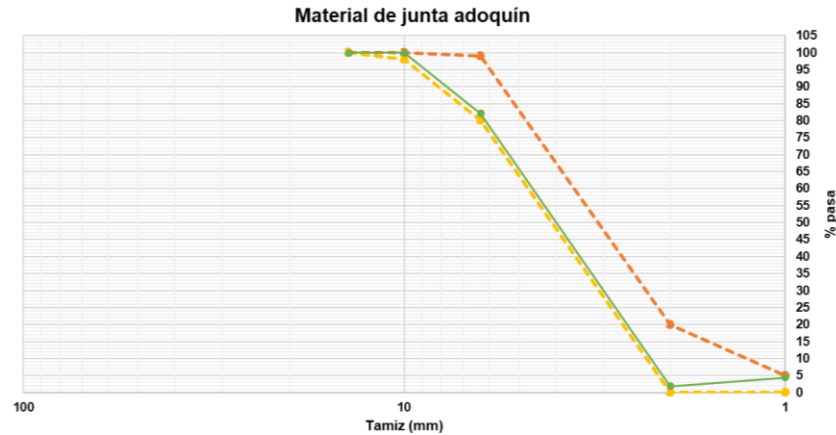
Tabla 19 Material de junta adoquín

Material de junta adoquín					
Tamiz (mm)	14	10	6,3	2	1
Tamiz	1/2"	3/8"	1/4"	10	14
Máxima	100	100	99	20	5
Mínima	100	98	80	0	0
Granulometría Propuesta	100,00	99,94	82,07	1,83	4,39

Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 5 Material de junta adoquín



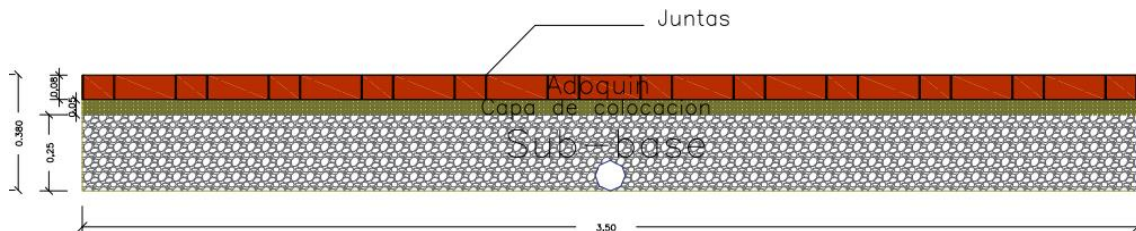
Fuente: Elaboración Propia

11.1.1.2. Características de la estructura de pavimento

La estructura de pavimento evaluada en este trabajo presenta unas dimensiones en su sección transversal de 3.50 m. El adoquín utilizado consta de de 0.08 m, un ancho de 0.10 m y una longitud de 0.20 m. En cuanto al valor de conductividad hidráulica, se contempla 0,2151 m/s obtenida del documento “VARIACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DE PAVIMENTOS DRENANTES ELABORADOS CON GRAVAS DE TMN 1” Y 1/2”.” en donde se evalúa la permeabilidad del concreto con agregados de tamaños de 1” y 1/2”. Se estableció un espesor de juntas de 10 mm y un tramado de unión convencional.

La capa de colocación se considera de un espesor de 0.05 m y la sub-base de 0.25 m, para un espesor total de 0.38 m.

Ilustración 8 Modelo del pavimento



Fuente: Elaboración Propia



11.1.2. Caracterización Hidráulica

Por medio del software soil wáter characteristics se realizó la modelación de las granulometrías establecidas con el fin de obtener la conductividad hidráulica y fue corroborada con las fórmulas en las que se basa el software.

Este programa establece valores de conductividad hidráulica de un suelo matricial proponiendo ecuaciones con base en las tensiones de humedad en rangos de 1500 33 y 0 kPa.

Para la modelación fue necesario introducir cantidades porcentuales de los materiales del suelo matricial en los que se contempla la arena, limo, arcilla y marga, con los que el software define la clasificación del suelo por textura, además de esto se ingresa en una escala la compactación que tiene un rango de 0,9 a 1,3.

Para la obtención de datos iniciales de conductividad hidráulica se evaluó un suelo con textura de arena y se establecieron valores de compactación de 1(normal), 0,95 (suelto) y 1,05 (denso).

Con estos valores se presentan resultados de conductividad hidráulica saturada como se muestra en la Ilustración 9 e Ilustración 10.

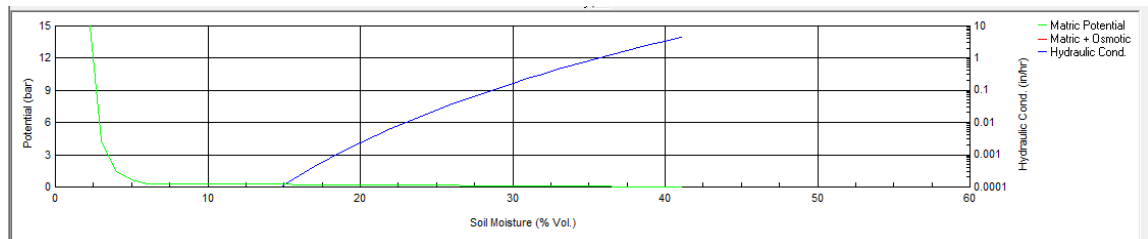
Sin embargo, para la ratificación y evaluación de variables se realizó una hoja de cálculo en donde se formularon las ecuaciones del trabajo Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions[34]. De donde se obtuvo valores de

Ilustración 9 Tablero de resultados soil water characteristics

Soil Characteristics	
Texture Class:	Sand
Wilting Point	2.1 % Vol
Field Capacity	5.9 % Vol
Saturation	41.1 % Vol
Available Water	0.45 in/ft
Sat. Hydraulic Cond	4.36 in/hr
Matric Bulk Density	97.47 lb/ft ³
Organic Matter	
0.0 % Wt	0 1 2 3 4 5 6 7 8
Salinity	
0.0 dS/m	0 5 10 15 20
Gravel	
0 % Vol	0 10 20 30 40 50
Compaction	
1.00	Loose Normal Dense Hard Sever
Moisture Calculator	
13.7 % Vol	0 10 20 30 40 50 60
Matric Potential:	0.26 bar
Matric + Osmotic:	0.26 bar
Hydraulic Cond.:	4.08E-5 in/hr

Fuente: Tablero de resultados Soil Water Characteristics

Ilustración 10 Grafica de conductividad hidráulica, humedad del suelo y potencial (Soil water characteristic)



Fuente: Grafica de conductividad hidráulica, humedad del suelo y potencial (Soil water characteristic)

Sin embargo, para la ratificación y evaluación de variables se realizó una hoja de cálculo en donde se formularon las ecuaciones del trabajo Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions [34]. De donde se obtuvo valores de densidad y tensión modificados por los efectos de compactación en el suelo Tabla 20 y con estos resultados se pasó a las ecuaciones de conductividad hidráulica y se obtuvieron resultados de conductividad para cada condición de compactación como lo resume la Tabla 21.



Tabla 20 Variables modificadas por la compactación

TIPOS DE SUELO	VARIABLE	Efectos de densidad		
		Normal	Suelta	Denso
SUB-BASE 1	PDF	1,521	1,445	1,597
	θ_s -DF	0,426	0,455	0,397
	θ_{33} -DF	0,036	0,042	0,030
	$\theta(s-33)$ DF	0,390	0,413	0,367
SUB-BASE 2	PDF	1,521	1,445	1,597
	θ_s -DF	0,426	0,455	0,397
	θ_{33} -DF	0,036	0,042	0,030
	$\theta(s-33)$ DF	0,390	0,413	0,367
SUB-BASE 3	PDF	1,521	1,445	1,597
	θ_s -DF	0,426	0,455	0,397
	θ_{33} -DF	0,036	0,042	0,030
	$\theta(s-33)$ DF	0,390	0,413	0,367
CAPA DE COLOCACIÓN	PDF	1,5214	1,4454	1,597
	θ_s -DF	0,4259	0,4546	0,397
	θ_{33} -DF	0,0359	0,0416	0,03
	$\theta(s-33)$ DF	0,39	0,413	0,367
JUNTA	PDF	1,5214	1,4454	1,597
	θ_s -DF	0,4259	0,4546	0,397
	θ_{33} -DF	0,0359	0,0416	0,03
	$\theta(s-33)$ DF	0,39	0,413	0,367

Fuente: Elaboración propia

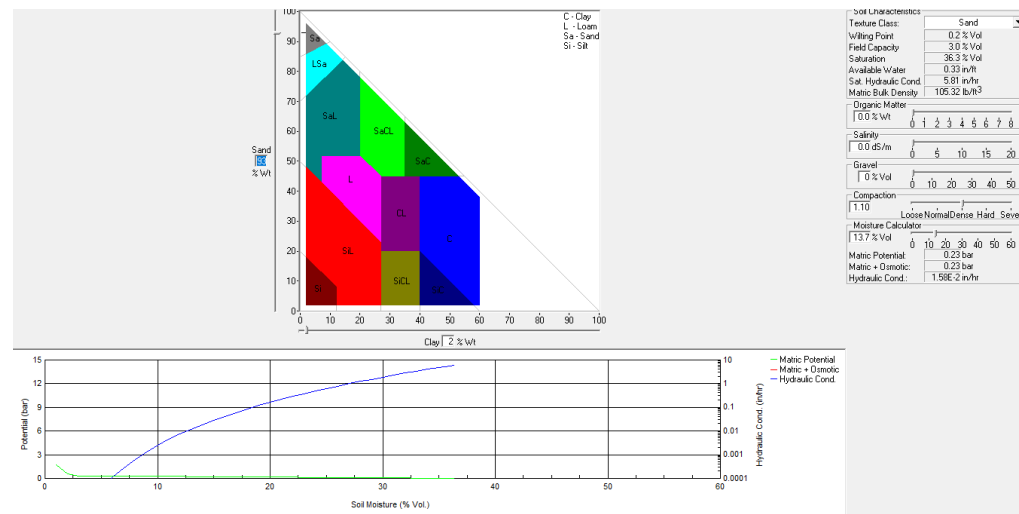
Tabla 21 Conductividad hidráulica saturada con y sin efectos de compactación

TIPOS DE SUELO	VARIABLE	Conductividad hidráulica			
		Sin efecto de compactación	Normal	Suelta	Denso
SUB-BASE 1	Ks	241,294	241,294	283,373	201,582
	λ	0,792	0,792	0,831	0,746
SUB-BASE 2	Ks	241,294	241,294	283,373	201,582
	λ	0,792	0,792	0,831	0,746
SUB-BASE 3	Ks	241,294	241,294	283,373	201,582
	λ	0,792	0,792	0,831	0,746
CAPA DE COLOCACIÓN	Ks	241,294	241,294	283,373	201,582
	λ	0,792	0,792	0,831	0,746
JUNTA	Ks	241,294	241,294	283,373	201,582
	λ	0,792	0,792	0,831	0,746

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 11 Ejemplo de modelación en soil water characteristic



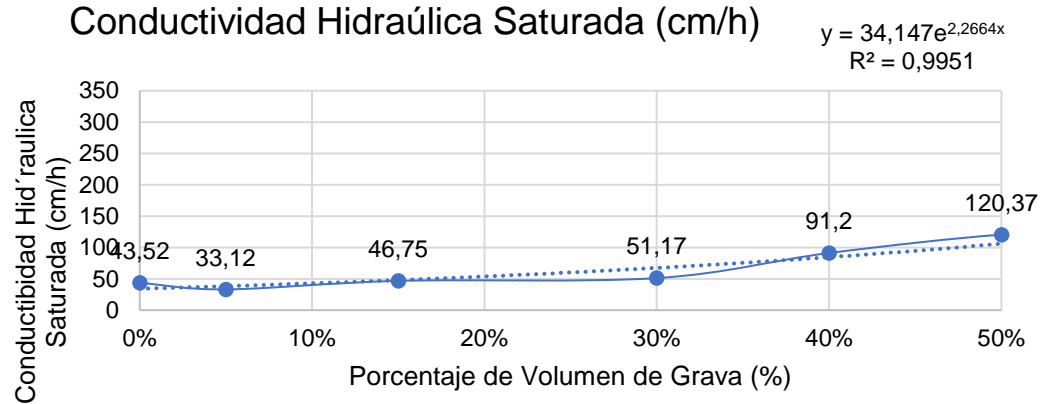
Fuente: Interfaz gráfica: modelación en soil water characteristic

Debido a que la conductividad obtenida está dada para un tipo de suelo arenoso se procedió a realizar consulta bibliográfica para establecer el comportamiento de la conductividad hidráulica en dicho tipo de suelo con presencia de porcentajes determinados de grava.

Por medio de los resultados encontrados en el documento “effect of gravel content on saturated hydraulic conductivity in sand” [45] en el que se encuentra el efecto del porcentaje de grava hasta de un 50% en la arena para los resultados de conductividad hidráulica como se muestra en la Gráfica 6, por lo que se realizó una proyección de datos para conocer el efecto de la grava en porcentajes más altos como se muestra en la Gráfica 7 que dio como resultado un aumento exponencial de la conductividad con el aumento del porcentaje de grava.

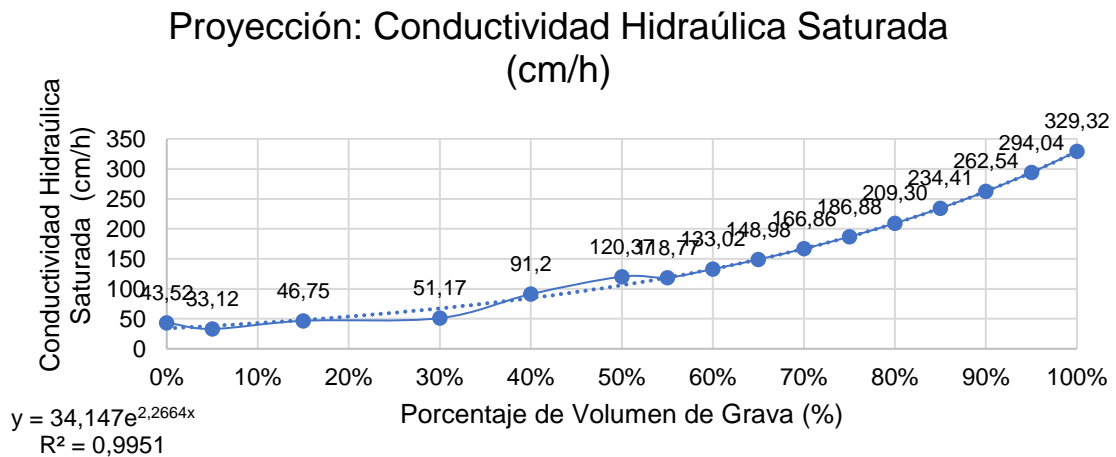


Gráfica 6 Conductividad Hidráulica saturada



Fuente: Effect of Gravel Content on Saturated Hydraulic Conductivity in Sand

Gráfica 7 Proyección de datos Conductividad hidráulica

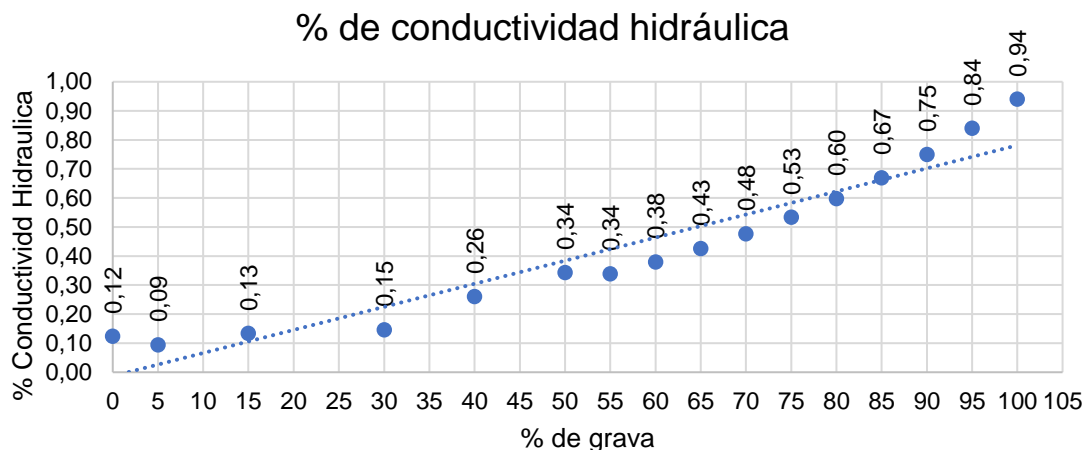


Fuente: Elaboración propia

Con los datos adquiridos se realizó una normalización con el fin de obtener el porcentaje de aumento de la conductividad hidráulica en base al porcentaje de grava en la mezcla consiguiendo los valores presentados en la Gráfica 8



Gráfica 8 Porcentaje conductividad hidráulica



Fuente: Elaboración propia

Con estos porcentajes y por medio de la evaluación del porcentaje de grava contenido en cada una de las granulometrías propuestas se realizó una interpolación para conocer el porcentaje de aumento en la conductividad hidráulica en cada uno, con el que se operó la conductividad hidráulica inicial Tabla 21 y se obtuvo el valor modificado con base al contenido de grava.

Tabla 22 Conductividad Hidráulica Modificada sub base #1³

Conductividad hidráulica modificada con 76,88% de grava

	Normal	Suelta	Densa
cm/h	24,129	28,337	20,158
Mas el 56%(cm/h)	37,642	44,206	31,447
m/s	1,05,E-04	1,23,E-04	8,74,E-05

Fuente: Elaboración propia

³ Fuente (Elaboración Propia, 2021)



Tabla 23 Conductividad Hidráulica Modificada sub base #2

Conductividad hidráulica modificada con 81,77% de grava

	Normal	Suelta	Densa
cm/h	24,129	28,337	20,158
Mas el 62% (cm/h)	39,162	45,991	32,717
m/s	1,09,E-04	1,28,E-04	9,09,E-05

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24 Conductividad Hidráulica Modificada sub base #3

Conductividad hidráulica modificada con 85,70% de grava

	Normal	Suelta	Densa
cm/h	24,129	28,337	20,158
Mas el 68% (cm/h)	40,562	47,635	33,886
m/s	1,13,E-04	1,32,E-04	9,41,E-05

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25 Conductividad Hidráulica Modificada Capa de colocación

Conductividad hidráulica modificada con 85,96% de grava

	Normal	Suelta	Densa
cm/h	24,129	28,337	20,158
Mas el 68.5% (cm/h)	40,658	47,748	33,967
m/s	1,13,E-04	1,33,E-04	9,44,E-05

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26 Conductividad Hidráulica Modificada Juntas

Conductividad hidráulica modificada con 80% de grava

	Normal	Suelta	Densa
cm/h	24,129	28,337	20,158
Mas el 60% (cm/h)	38,607	45,340	32,253
m/s	1,07,E-04	1,26,E-04	8,96,E-05

Fuente: Elaboración propia

Los valores obtenidos por medio de esta operación están en función del porcentaje de grava mas no del tamaño, por lo que se consideró el porcentaje de grava a partir del peso retenido en el tamiz de 2,36 mm o tamiz # 8.

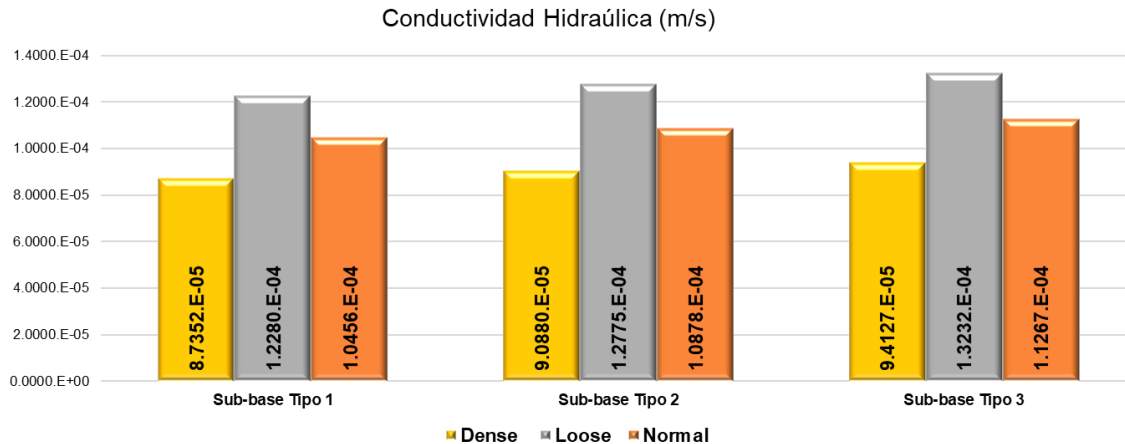
Para efectos y consideraciones del tamaño de las partículas, se toma como referencia la clasificación de la Organización Internacional American Association Of State Highway and Transportation Official (AASHTO), cuya clasificación define abertura en milímetros de las mallas que comprenden el material grueso, arenas, limo y arcillas, en la Tabla 11.

Tabla 27 Tabla resumen conductividad hidráulica⁴

	Sub-base Tipo 1	Sub-base Tipo 2	Sub-base Tipo 3
Compactación	Conductividad hidráulica (m/s)	Conductividad hidráulica (m/s)	Conductividad hidráulica (m/s)
Densa	8,735,E-05	9,088,E-05	9,412,E-05
Suelta	1,228,E-04	1,277,E-04	1,323,E-04
Normal	1,045,E-04	1,087,E-04	1,126,E-04

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 9 Conductividad hidráulica (m/s)



Fuente: Elaboración propia

⁴ Fuente (Elaboración Propia, 2021)



11.1.2.1. Clasificación de la permeabilidad del suelo según INVIAS

De acuerdo con la Tabla 13 y los resultados de conductividad hidráulica que se encuentran en el rango de 5×10^{-3} y 10, se identifica que la sub-base presenta condiciones de permeabilidad relativa de permeable a muy permeable, en un material de grava pobremente gradada.

11.1.2.2. Curvas Intensidad, Duración, Frecuencia (IDF)

Se toman valores pertenecientes a la curva IDF denominada: ESTACIÓN: U.P.T.C (TUNJA) - CODIGO: 2403513. Para la modelación bajo condiciones de precipitación definidas por la curva mencionada.

Teniendo en cuenta los requerimientos de diseño expuestos en el Manual de Drenaje para carreteras INVIAS, para el drenaje de una corona, es necesario, calcular con un periodo de retorno de 50 años y una duración de 10 minutos.

Estos datos que se extraen por medio de la Ecuación 21 Ecuación

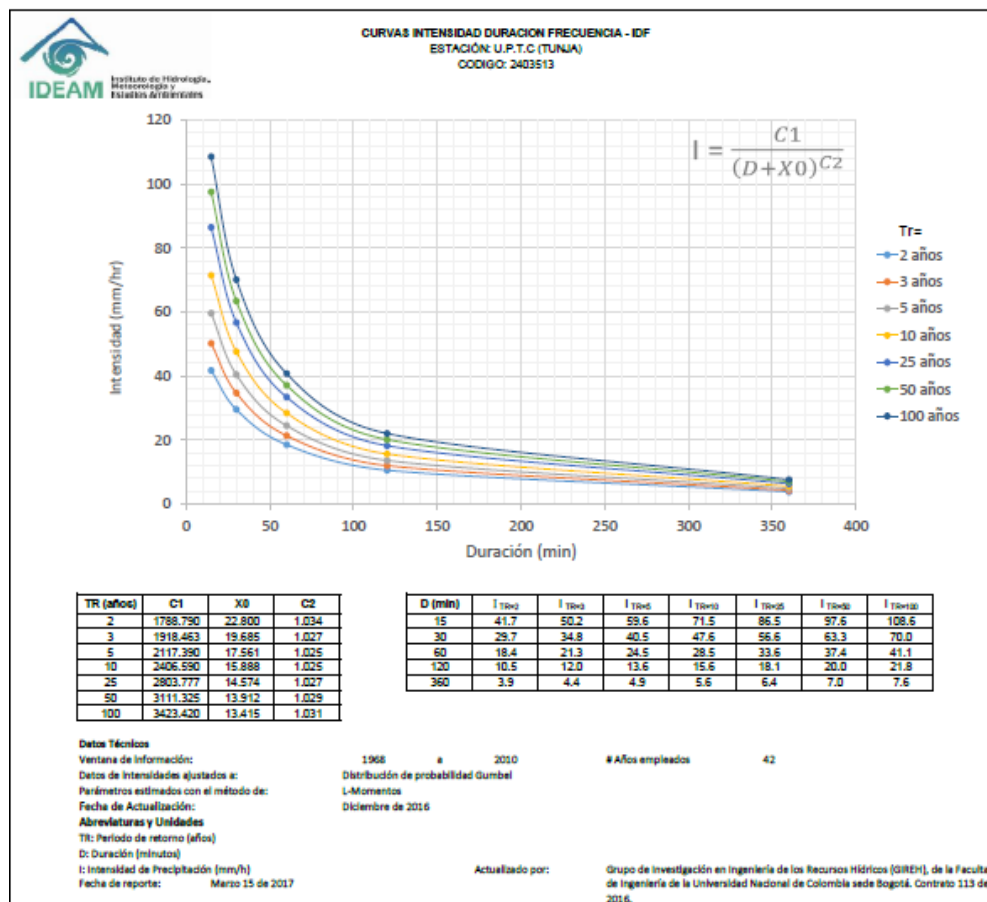
Ecuación 21 Ecuación Intensidad

$$i = \frac{C_1}{(D + X_0)^{C_2}} \quad \text{Ecuación Intensidad (mm/h)}$$

Al calcular mediante la ecuación se obtienen valores para una duración de 10 minutos con un periodo de retorno de 50 años, que da como resultado una intensidad de 118,67 mm/h.



Gráfica 10 Curva Intensidad Duración Frecuencia - IDF - Tunja



Fuente: Información de IDEAM.GOV.CO

Para esta misma estación se tomó un segundo dato que corresponde a un periodo de retorno de 50 años y una duración de 60 minutos, dando un valor de intensidad de 37,4 mm/h.

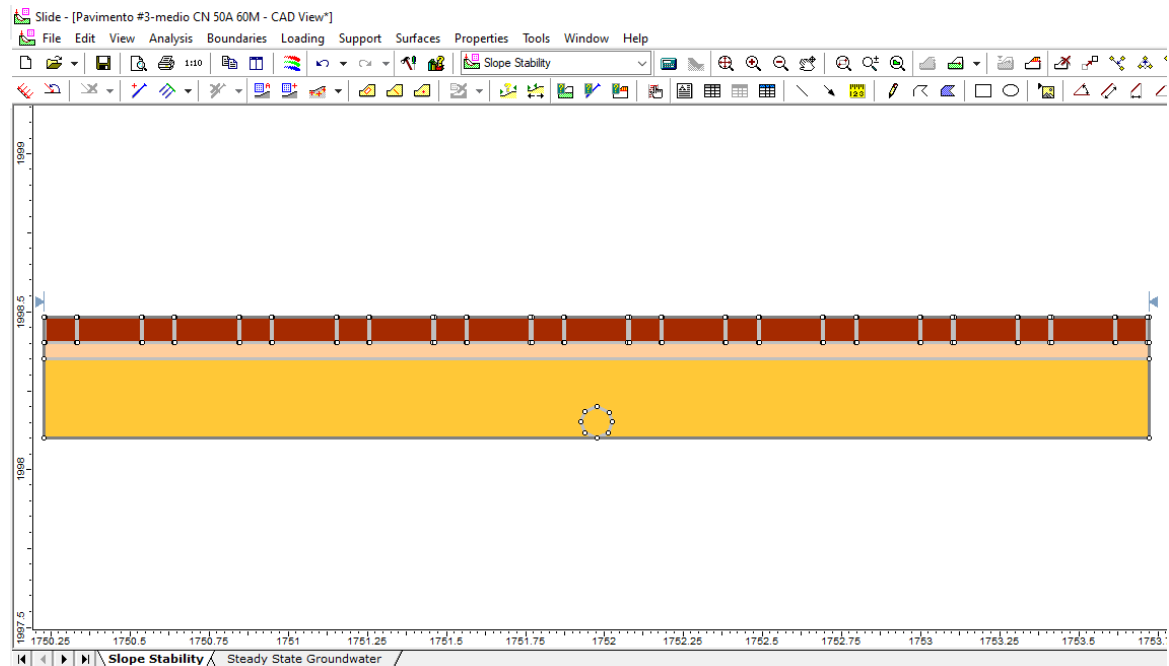
11.1.3. Modelación SLIDE

Para la modelación en slide, en principio se estableció la geometría del pavimento en el modelo y se crearon materiales para cada capa, insertando el límite del material, así como también se modelo una tubería en medio de la estructura en el fondo estableciendo el límite del material en forma de un octágono para hacer semejanza a una circunferencia como se



muestra en la Ilustración 12, ya que es una forma de aumentar la discretización de la simulación de la tubería aumentando los elementos triangulares.

Ilustración 12 Modelación de Estructura de Pavimento

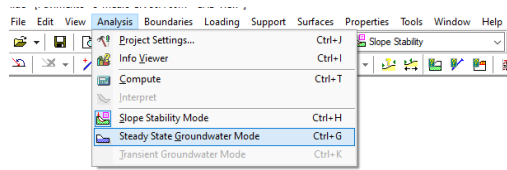


Fuente: Modelación de Estructura de Pavimento – SLIDE

Posterior a esto, se establece el modelo de análisis que será *steady state groundwater* (agua subterránea en estado estacionario), que es usado para el análisis de la napa freática Ilustración 13, en donde se establecen los valores de conductividad hidráulica en cada material, como se observa en la Ilustración 14 , y se procede a discretizar los límites de materiales seleccionando un número aproximado de elementos que se quieran crear en la malla y se define el tipo del elemento como 3 nodos (triángulo), Ilustración 15, se procede a crear la malla Ilustración 16



Ilustración 13 Modelo de Análisis Steady state groundwater



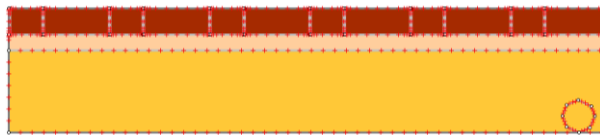
Fuente: Modelación de Estructura de Pavimento –
SLIDE

Ilustración 14 Valores de Conductividad Hidráulica en cada capa

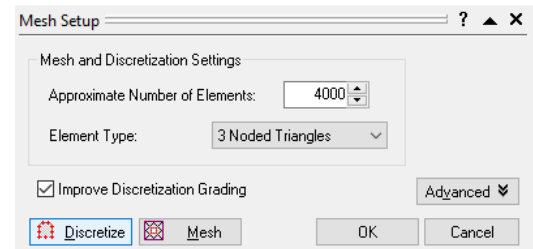
Material Name	Color	Model	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle	Soil Type
Adoquin		Simple	0.2151	1	0	General
Juntas		Simple	0.0001072	1	0	General
Capa de colocacion		Simple	0.0001129	1	0	General
Sub Base		Simple	0.00011267	1	0	General

Fuente: Modelación de Estructura de Pavimento –
SLIDE

Ilustración 15 Discretización de Elementos

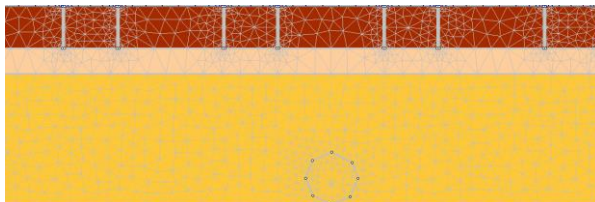


Fuente: Modelación de Estructura de Pavimento –
SLIDE

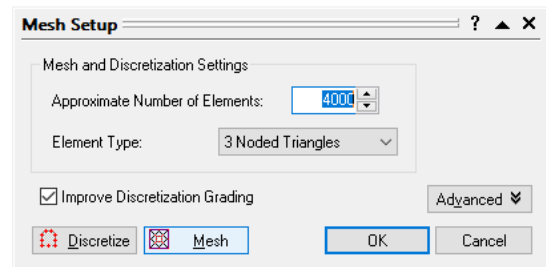


Fuente: Modelación de Estructura de Pavimento –
SLIDE

Ilustración 16 Configuración de malla



Fuente: Modelación de Estructura de Pavimento –
SLIDE



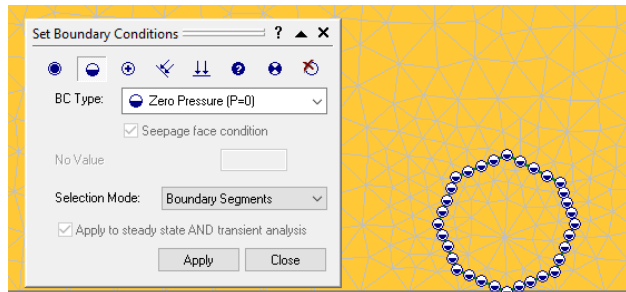
Fuente: Modelación de Estructura de Pavimento –
SLIDE

Ahora se modelaron las condiciones de borde en la tubería seleccionando el contorno con presión cero, como se observa en la Ilustración 17 , para inducir la conducción del agua hacia esta tubería, además de esto, se establece un contorno de sección de descarga con el fin de conocer el caudal que llega a la tubería.



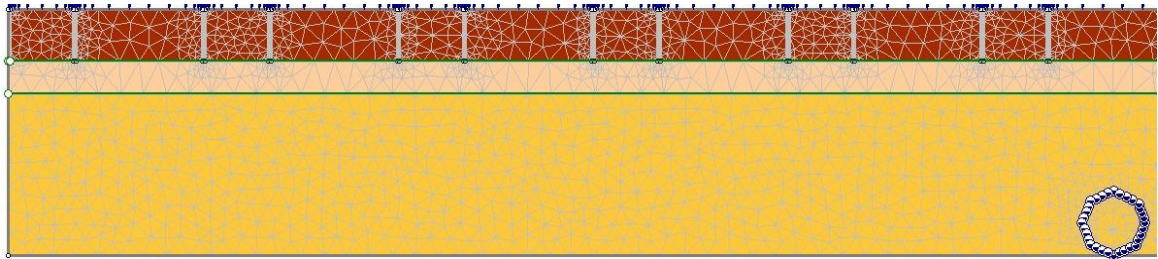
Adicionalmente, se establece la condición de contorno sección de descarga en el límite superior de la capa de colocación con el fin de conocer el caudal de llegada a las capas granulares del pavimento. Ilustración 18

Ilustración 17 Condiciones de borde



Fuente: Modelación de Estructura de Pavimento – SLIDE

Ilustración 18 Sección de Descarga

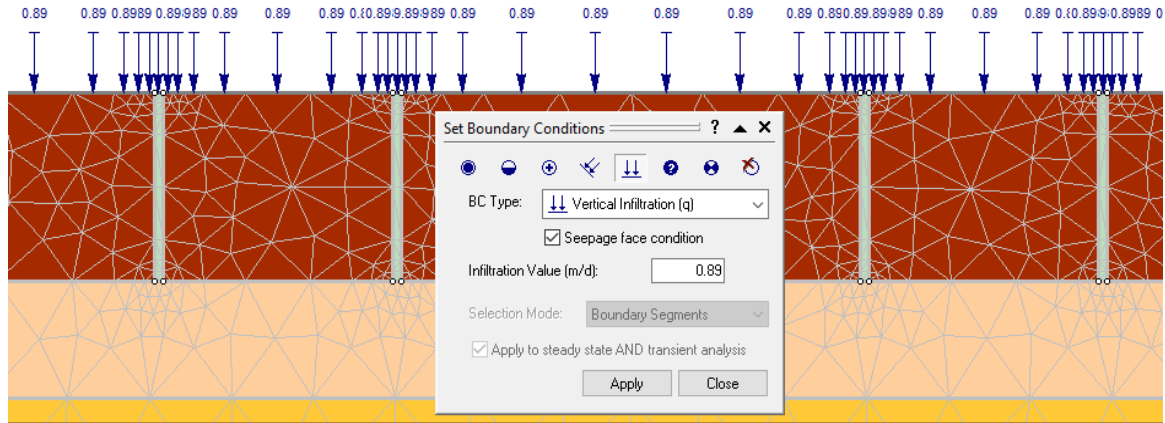


Fuente: Modelación de Estructura de Pavimento – SLIDE

Posterior a esto se intruce el valor de agua a infiltrar en la superficie del pavimento en las condiciones de borde, con una condicion de infiltracion vertical Ilustración 19, con el resultado final de la modelacion.

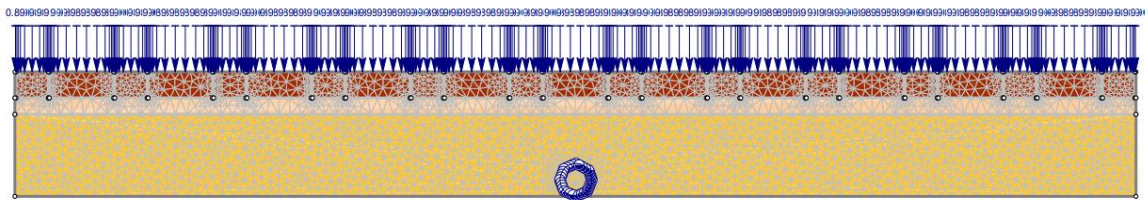


Ilustración 19 Infiltración Vertical



Fuente: Modelación de Estructura de Pavimento – SLIDE

Ilustración 20 Modelación Final



Fuente: Modelación de Estructura de Pavimento – SLIDE

Luego de establecer las condiciones iniciales mediante la configuración de las variables de entrada, se procede a computar las variables para proceder a la interpretación de resultados.

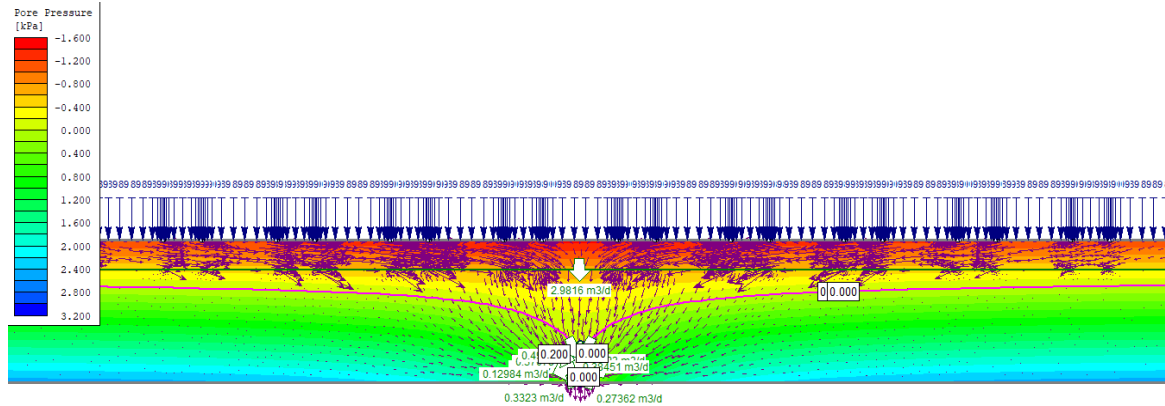
11.1.3.1. Resultados Modelación

Con el compute de resultados, se procede a la pestaña Slide Interpreter, donde se encuentra el comportamiento que va a tener el modelo en distintas variables, como lo es: Presión de poros, velocidad de descarga, caudal, entre otros.

De los resultados se observa el comportamiento de las líneas de flujo a lo largo del sistema,

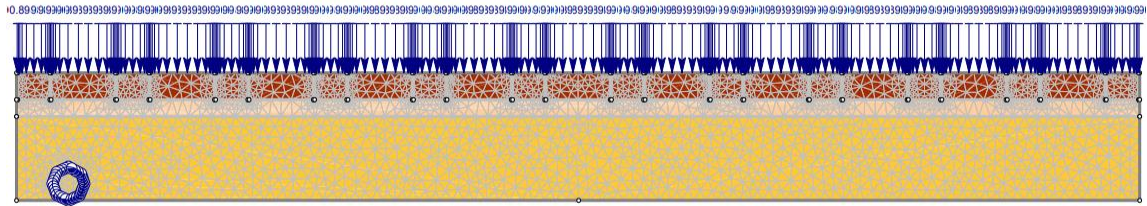
como se muestra en Ilustración 21 . El agua dentro de la capa se dirección a la posición de la tubería.

Ilustración 21 Presión de Poros



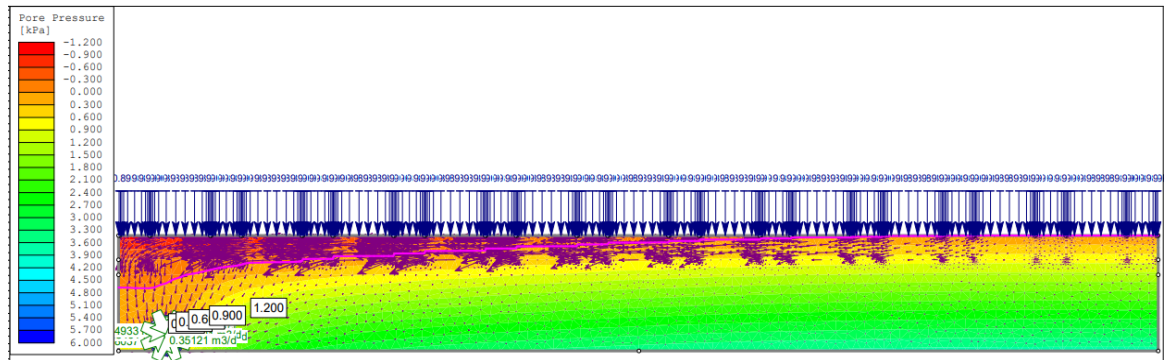
Fuente: Modelación de Estructura de Pavimento – SLIDE

Ilustración 22 Modelación final Tubería Lateral



Fuente: Modelación de Estructura de Pavimento – SLIDE

Ilustración 23 Presión de poros - Tubería Lateral



Fuente: Modelación de Estructura de Pavimento – SLIDE



Tubería Central

Las consideraciones técnicas dentro de los procesos de modelación en este tipo de estructuras con particularidades hidráulicas definidas, para este caso de escorrentía, buscan constituir sistemas que, aparte de drenar agua de la superficie, además de almacenarla en la estructura de pavimento, también logren establecer elementos de captación y drenaje de agua filtrada. Para ello, se analizan datos técnicos e hidráulicos con una tubería central de 10cm de diámetro que entregue el caudal filtrado y permita conocer los valores del comportamiento hidráulico.

Luego del proceso de modelación de la estructura, considerando que los valores obtenidos de conductividad hidráulica se establecen, en función de la compactación, para los tres tipos de sub-base, al realizar la modelación, permite identificar las características drenantes de estos con base a parámetros establecidos.

Lo anterior, precisa de forma preliminar el comportamiento filtrante del fluido a lo largo de la estructura, teniendo en cuenta valores de entrada definidos que sirven de insumo para la modelación en el software SLIDE.

Las características de compactación del material constituyen un factor de relevancia que permiten identificar condiciones relacionadas con la relación de vacíos presentes en la estructura en prueba.

El caudal total que se observa en la Tabla 28, esta definido como el caudal presente en la superficie, caudal en la estructura y caudal filtrado en cada sub-base, de acuerdo a la compactación y duración de precipitación.

Tabla 28 Caudales con Tubería Central

Compactación	Duración (min)	Intensidad (m/d)	Caudal Total en la superficie (m ³ /d)	Caudal Total en el interior del pavimento (m ³ /d)	Sub-base tipo 1		Sub-base tipo 2		Sub-base tipo 3	
					Caudal (m ³ /d) Filtrado	Caudal Total en el interior del pavimento (m ³ /d)	Caudal (m ³ /d) Filtrado	Caudal Total en el interior del pavimento (m ³ /d)	Caudal (m ³ /d) Filtrado	Caudal Total en el interior del pavimento (m ³ /d)
Normal	10	2,85	9,975	5,633	4,352	5,836	4,518	6,023	4,672	6,023
Suelta	10	2,85	9,975	6,651	5,082	6,689	5,241	6,804	5,366	6,804
Denso	10	2,85	9,975	4,789	3,668	4,964	3,809	5,124	3,939	5,124
Normal	60	0,89	3,142	2,981	2,599	2,981	2,631	2,982	2,660	2,982
Suelta	60	0,89	3,142	2,983	2,736	2,984	2,773	2,984	2,807	2,984
Denso	60	0,89	3,142	2,979	2,471	2,980	2,497	2,980	2,176	2,980

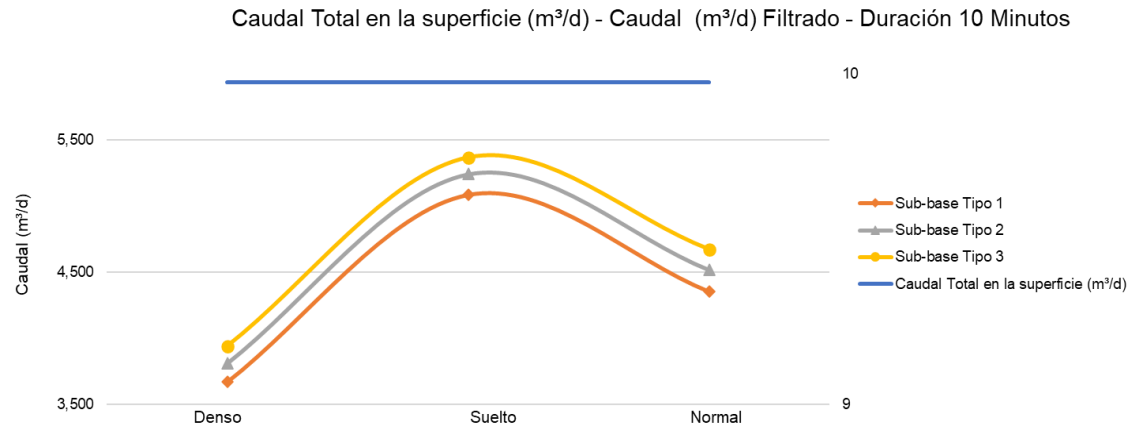
Fuente: Elaboración propia

La evaluación de la condición de la sub-base genera que se conozca los valores de filtración de caudal de acuerdo con las energías de compactación que se apliquen sobre el material. En la Tabla 28 se muestra el caudal presente en la capa de rodadura justo antes del proceso de filtrado. Conociendo los valores de conductividad hidráulica y mediante la modelación de las condiciones de la capa de pavimento en el software Slide, se determina, en unidades de m³/d, el caudal filtrado a lo largo de la estructura y el caudal drenado al sistema de captación y almacenamiento.

La evaluación se realiza en los tres tipos de sub-base ensayados bajo condiciones y cuya naturaleza hidráulica es particular en cada caso.



Gráfica 11 Caudal Total en la Superficie - Duración 10 Minutos



Fuente: Elaboración propia

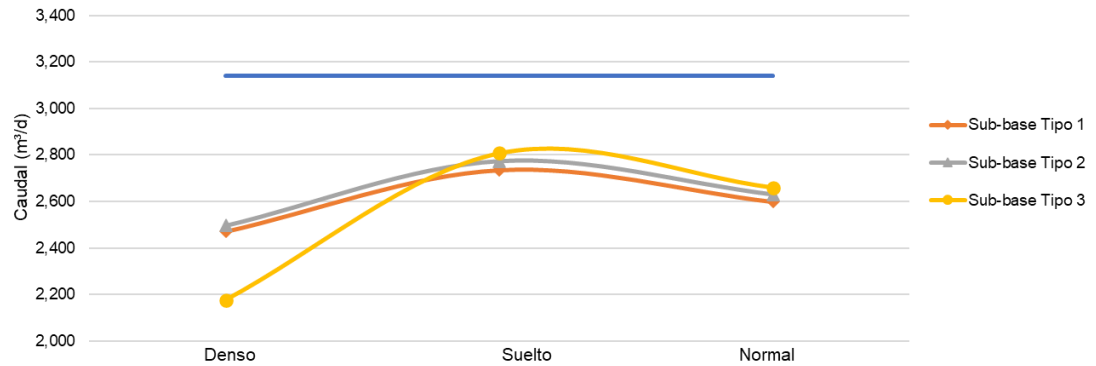
Al graficar de los resultados deja ver la brecha existente entre el caudal de entrega a la estructura, el caudal filtrado y el caudal drenado. Se observa que los tres tipos de sub-base generan unos procesos de filtrado diferente a razón de la compactación y el periodo de retorno

que no son acorde a las necesidades del servicio u objeto misional de capa, considerando una baja eficiencia del sistema, dadas las diferencias existentes entre caudales a filtrar y caudal filtrado.



Gráfica 12 Caudal Total en la Superficie - Duración 60 Minutos

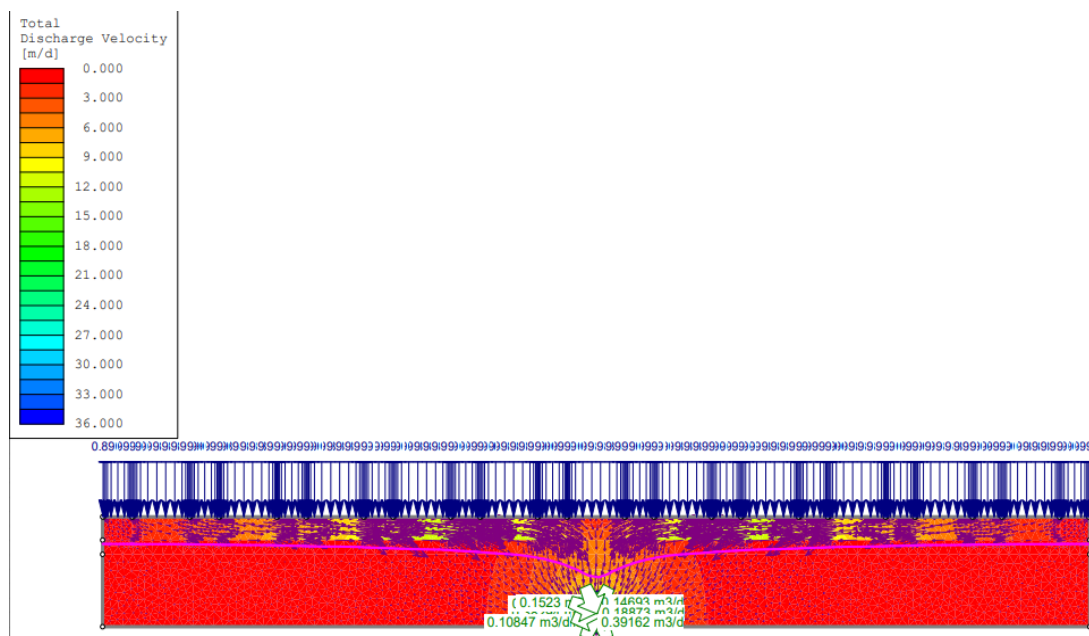
Caudal Total en la superficie (m^3/d) - Caudal (m^3/d) Filtrado



Fuente: Elaboración propia

Teniendo como base la duración de la precipitación e información adicional que suministra las curvas IDF, se observa que el comportamiento de filtración es similar, en condiciones de duración correspondientes a 10 minutos y 60 minutos, lo que infiere que, a pesar del tiempo de duración, la estructura no logra suplir el filtrado requerido y, por lo tanto, las condiciones físicas de la sub-base se deben replantear para incrementar la eficiencia.

Ilustración 24 Velocidad de descarga



Fuente: Modelación de Estructura de Pavimento – SLIDE

Tabla 29 Velocidad de descarga total (m/d)

	Sub-base tipo 1	Sub-base tipo 2	Sub-base tipo 3	
Compactación	Velocidad de descarga total (m/d)	Velocidad de descarga total (m/d)	Velocidad de descarga total (m/d)	Duración (min)
Densa	8,00	8,50	8,50	10
Suelta	14,00	12,00	12,50	10
Normal	9,50	9,50	10,00	10
Densa	7,50	7,50	7,50	60
Suelta	11,00	11,00	12,00	60
Normal	10,50	10,00	10,00	60

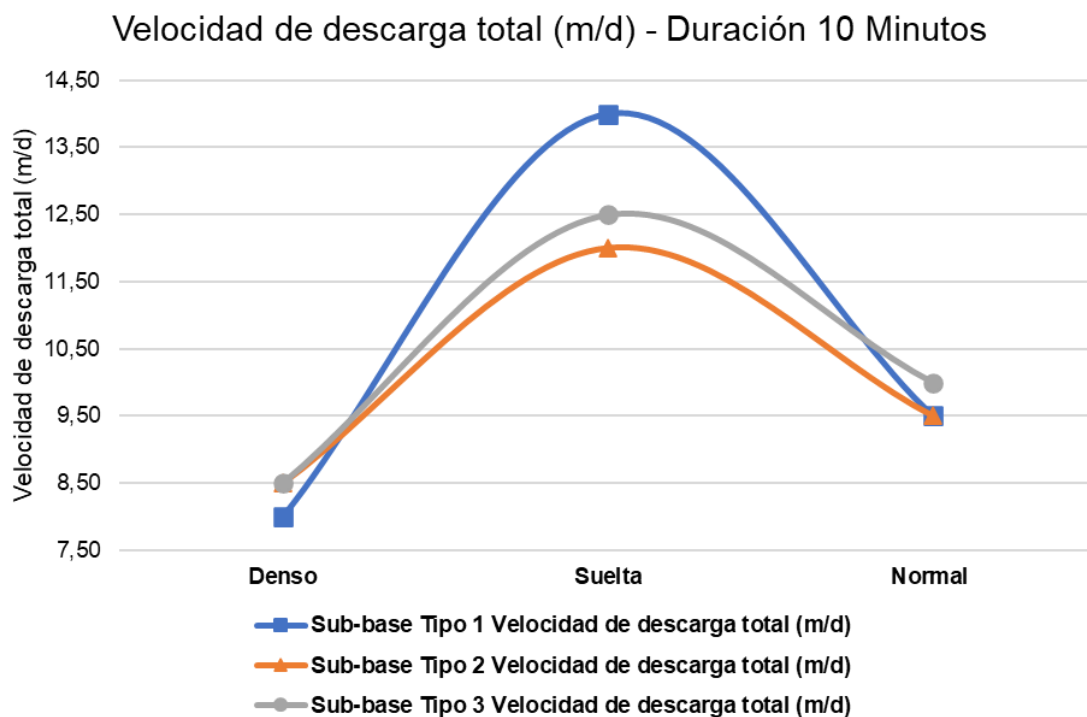
Fuente: Elaboración Propia

La velocidad de descarga es un factor incidente y de estudio en la investigación comportamental de una estructura drenante, máxime si se tienen en cuenta condiciones hidráulicas especiales que midan una eficiencia en campo.

Se realiza una evaluación de la velocidad de descarga total teniendo en cuenta la energía de compactación dada al material, en función de la conductividad hidráulica la duración del caudal de precipitación.

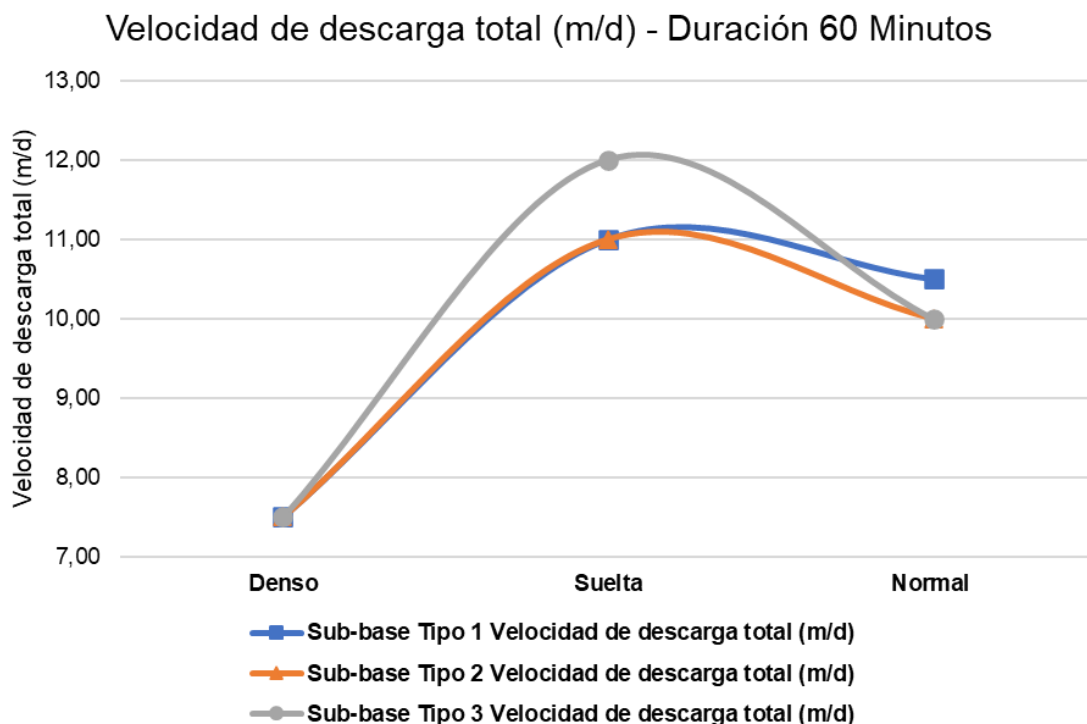
Se observa con claridad la relación proporcional existente entre la energía de compactación y la velocidad de descarga. Se evidencia disminución de la velocidad cuando se incrementa la energía de compactación. La duración se considera factor relevante y no incidente en los resultados expuestos en la modelación.

Gráfica 13 Velocidad de descarga total (m/d) - Duración 10 Minutos



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 14 Velocidad de descarga total (m/d) - Duración 60 Minutos



Las gráficas soportan las conclusiones allegadas luego de la interpretación de valores y resultados. Las gráficas dan claridad acerca de una velocidad mayor en virtud de una compactación ligera, normal y densa.

Tubería Lateral

La tubería lateral es otra forma de proponer un sistema de drenaje alternativo al sistema en estudio. Las variables en consideración precisan las condiciones particulares de la capa de pavimento orientadas a desarrollar funciones hidráulicas que involucren la presencia de agua en la capa de rodadura y a lo largo de la sub-base.

La tubería lateral se modela con la pretensión de mejorar el proceso de drenaje y las propiedades de esta.

Se evalúan propiedades similares a las tomadas en la tubería central.

La conductividad hidráulica se establece según parámetros iniciales de modelación

Tabla 30 Caudales - Tubería Lateral⁵

Compactación	Duración (min)	Intensidad (m/d)	Caudal Total en la superficie (m ³ /d)	Sub-base Tipo 1		Sub-base Tipo 2		Sub-base Tipo 3	
				Caudal Total Filtrado (m ³ /d)	Caudal (m ³ /d) Drenado	Caudal Total Filtrado (m ³ /d)	Caudal (m ³ /d) Drenado	Caudal Total Filtrado (m ³ /d)	Caudal (m ³ /d) Drenado
Normal	10	2,85	9,975	4,0668	3,056	4,1675	3,141	4,2592	3,219
Suelta	10	2,85	9,975	4,4836	3,412	4,5834	3,502	4,6698	3,583
Denso	10	2,85	9,975	3,6255	2,695	3,721	2,765	3,8069	2,837
Normal	60	0,89	3,142	3,0422	2,226	3,0898	2,278	3,1266	2,32
Suelta	60	0,89	3,142	3,2331	2,428	3,2291	2,458	3,229	2,474
Denso	60	0,89	3,142	2,8194	1,999	2,8693	2,048	2,9083	2,09

Fuente: Elaboración propia

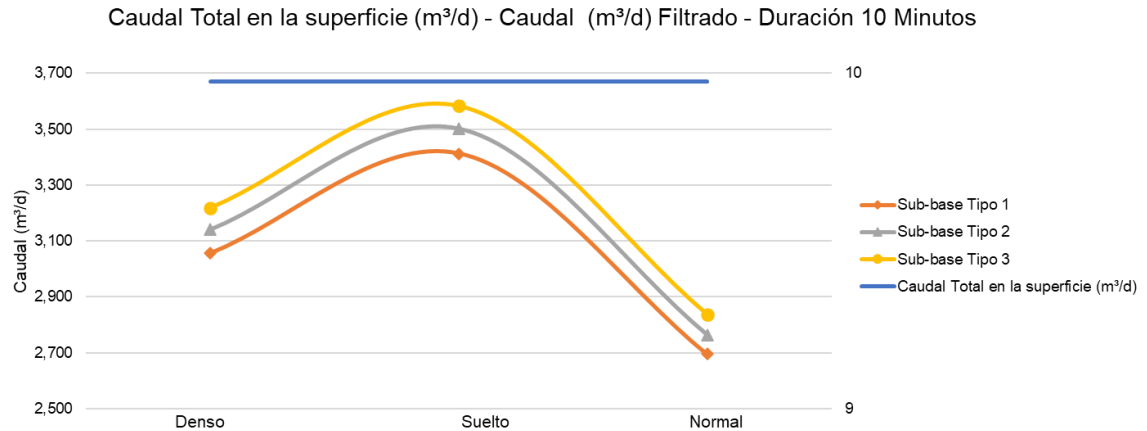
En las sub-bases evaluadas y con las tres energías de compactación que considera un pavimento permeable, se evalúa caudales de entrega a la sub-base y caudales de captación o drenaje en el sistema final.

Se logra evidenciar que la constitución granulométrica de la capa, a pesar de presentar diferencias en su gradación, genera resultados similares de caudales de drenaje, con una incidencia parcial en referencia a la energía de compactación impresa en la capa. Lo anterior, permite inferir que la geometría de las partículas repercute en este tipo de evaluaciones, si existen diferencias notorias en los porcentajes pasa de cada tamiz.

⁵ Fuente (Elaboración Propia, 2021)

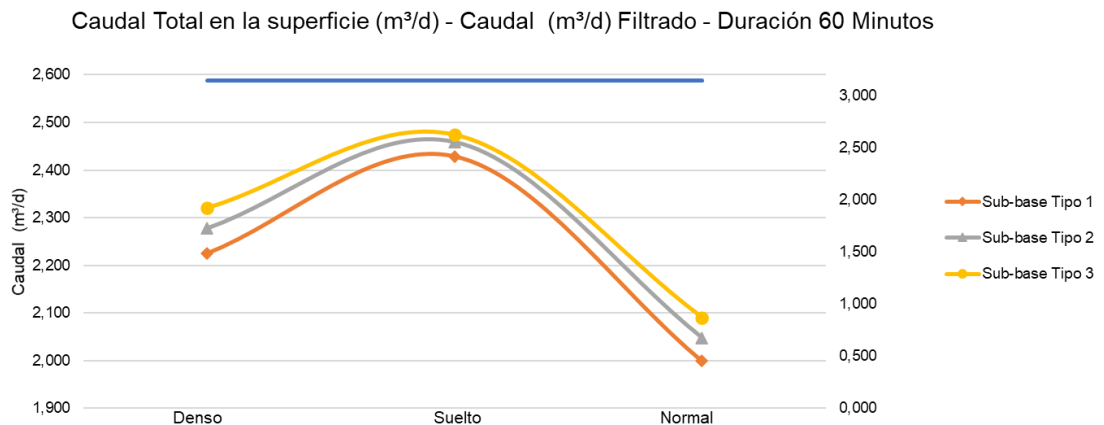


Gráfica 15 Caudal Total en la Superficie - Duración 10 Minutos



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 16 Caudal Total en la Superficie - Duración 60 Minutos

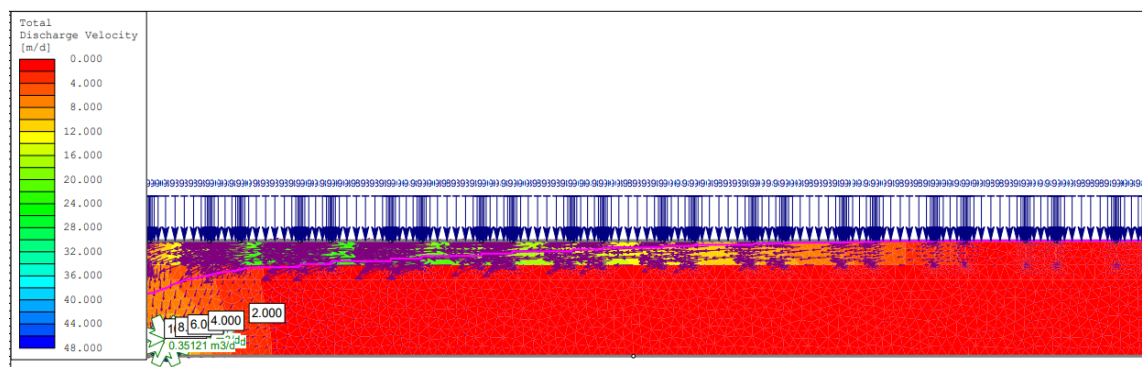


Fuente: Elaboración propia

El caudal de infiltración y el caudal entregado en la capa de rodadura permiten medir la eficiencia de la capa de sub-base, en función de la velocidad y tiempo de infiltración. La eficiencia de estos sistemas se establece en virtud de la capacidad que tenga este de desarrollar un potencial de infiltración muy cercano al caudal presente en la escorrentía.

La gráfica deja ver una diferencia de caudales. La solicitud de drenaje debe ser acorde a las necesidades de servicio presentes en la capa de rodadura.

Ilustración 25 Velocidad de descarga - Tubería Lateral



Fuente: Modelación de Estructura de Pavimento – SLIDE

Tabla 31 Velocidad de descarga total (m/d) - Tubería Lateral

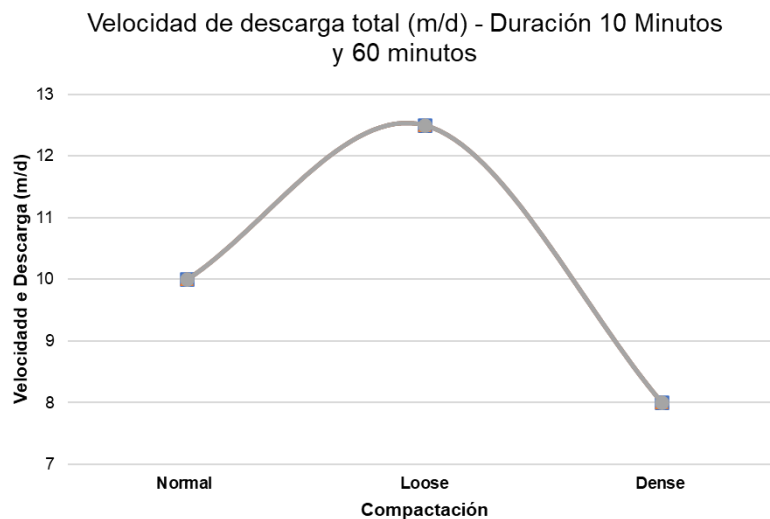
	Sub-base Tipo 1	Sub-base Tipo 2	Sub-base Tipo 3	
Compactación	Velocidad de descarga total (m/d)	Velocidad de descarga total (m/d)	Velocidad de descarga total (m/d)	Duración (min)
Normal	10,00	10,00	10,00	10
Suelta	12,50	12,50	12,50	10
Densa	8,00	8,00	8,00	10
Normal	10,00	10,00	10,00	60
Suelta	12,50	12,50	12,50	60
Densa	8,00	8,00	8,00	60

Fuente: Elaboración Propia

Con la modelación de una tubería lateral, se calcula la velocidad de descarga. Se observa resultados similares en los tiempos relacionados, con energías de compactación utilizadas en pavimentos permeables.



Gráfica 17 Velocidad de descarga total (m/d) - Duración 10 Minutos



Fuente: Elaboración Propia

11.1.4. Tiempo de infiltración

$$Q = \frac{v}{t}$$

Tabla 32 Tiempo de infiltración sub-base tipo 1 – 10 Minutos

Duración (min)	Compactación	Caudal Total Filtrado (mm³/h)	Volumen (mm³)	Tiempo (h)
10	Suelta	277,125	389,583333	1,406
10	Normal	234,7083	389,583333	1,660
10	Denso	199,5417	389,583333	1,952

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 33 Tiempo de infiltración sub-base tipo 1 - 60 Minutos

Duración (min)	Compactación	Caudal Total Filtrado (mm³/h)	Volumen (mm³)	Tiempo (h)
60	Suelta	124,2917	130,916667	1,053
60	Normal	124,2083	130,916667	1,054
60	Denso	124,125	130,916667	1,055

Fuente: Elaboración Propia



Tabla 34 Tiempo de infiltración sub-base tipo 2 - 10 Minutos

Duración (min)	Compactación	Caudal Total Filtrado (mm³/h)	Volumen (mm³)	Tiempo (h)
10	Suelta	278,7083	389,583333	1,398
10	Normal	243,1667	389,583333	1,602
10	Denso	206,8333	389,583333	1,884

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 35 Tiempo de infiltración sub-base tipo 2 - 60 Minutos

Duración (min)	Compactación	Caudal Total Filtrado (mm³/h)	Volumen (mm³)	Tiempo (h)
60	Suelta	124,3333	130,916667	1,053
60	Normal	124,2083	130,916667	1,054
60	Denso	124,1667	130,916667	1,054

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 36 Tiempo de infiltración sub-base tipo 3 - 10 Minutos

Duración (min)	Compactación	Caudal Total Filtrado (mm³/h)	Volumen (mm³)	Tiempo (h)
10	Suelta	283,5	389,583333	1,374
10	Normal	250,9583	389,583333	1,552
10	Denso	213,5	389,583333	1,825

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 37 Tiempo de infiltración sub-base tipo 3 - 60 Minutos

Duración (min)	Compactación	Caudal Total Filtrado (mm³/h)	Volumen (mm³)	Tiempo (h)
60	Suelta	124,3333	130,916667	1,053
60	Normal	124,25	130,916667	1,054
60	Denso	124,1667	130,916667	1,054

Fuente: Elaboración Propia

Con el cálculo de tiempo de infiltración, bajo los condicionales de duración de 10 y 60 minutos, se logra evidenciar tiempos promedio de 1,67 para la sub-base tipo 1, 1,63 para la sub-base tipo 2 y 1,58 horas para la sub-base tipo 3.



Se considera importante el tiempo de infiltración calculado, el cual, se considera óptimo dentro del funcionamiento del sistema y acorde con la eficiencia registrada en el aparte de resultados y análisis.

Se observa que los tiempos de infiltración dependen de la duración, la energía de compactación del material y las condiciones granulométricas del suelo. No obstante, se evidencia que los tiempos son similares bajo las condiciones descritas.

11.2. Análisis

La eficiencia de un sistema de drenaje consta de un proceso de filtración óptima y un drenaje que logre suplir las necesidades requeridas en la capa de rodadura en referencia a la presencia de lámina de agua sobre esta.

Para evaluar la eficiencia drenante de la estructura se realiza un comparativo entre caudal presente en la superficie del pavimento, el caudal filtrado por la estructura y el caudal drenado al sistema de almacenamiento.

Para efectos del cálculo de la eficiencia de infiltración, se establece la relación de caudal filtrado y caudal de entrega en la superficie, ya que, la condición de almacenamiento permite la filtración de un caudal mayor al drenado al sistema de almacenamiento.

Tabla 38 % Eficiencia Sub-base Tipo 1 – Duración 10 Minutos

Duración (min)	Compactación	Caudal Total en la superficie (m³/d)	Caudal Total Filtrado (m³/d)	% Eficiencia
10	Suelta	9,975	6,651	66,68%
10	Normal	9,975	5,633	56,47%
10	Denso	9,975	4,789	48,01%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 39 % Eficiencia Sub-base Tipo 1 – Duración 60 Minutos

Duración (min)	Compactación	Caudal Total en la superficie (m³/d)	Caudal Total Filtrado (m³/d)	% Eficiencia
60	Suelta	3,142	2,983	94,94%
60	Normal	3,142	2,981	94,88%
60	Denso	3,142	2,979	94,81%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 40 % Eficiencia Sub-base Tipo 2 – Duración 10 Minutos

Duración (min)	Compactación	Caudal Total en la superficie (m³/d)	Caudal Total Filtrado (m³/d)	% Eficiencia
10	Suelta	9,975	6,689	67,06%
10	Normal	9,975	5,836	58,51%
10	Denso	9,975	4,964	49,76%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 41 % Eficiencia Sub-base Tipo 2 – Duración 60 Minutos

Duración (min)	Compactación	Caudal Total en la superficie (m³/d)	Caudal Total Filtrado (m³/d)	% Eficiencia
60	Suelta	3,142	2,984	94,97%
60	Normal	3,142	2,981	94,88%
60	Denso	3,142	2,98	94,84%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 42 % Eficiencia Sub-base Tipo 3 – Duración 10 Minutos

Duración (min)	Compactación	Caudal Total en la superficie (m³/d)	Caudal Total Filtrado (m³/d)	% Eficiencia
10	Suelta	9,975	6,804	68,21%
10	Normal	9,975	6,023	60,38%
10	Denso	9,975	5,124	51,37%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 43 % Eficiencia Sub-base Tipo 3 – Duración 60 Minutos

Duración (min)	Compactación	Caudal Total en la superficie (m³/d)	Caudal Total Filtrado (m³/d)	% Eficiencia
60	Suelta	3,142	2,984	94,97%
60	Normal	3,142	2,982	94,91%
60	Denso	3,142	2,98	94,84%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 44 % Eficiencia Sub-base – 10 Minutos

		Sub-base tipo 1	Sub-base tipo 2	Sub-base tipo 3
Duración (min)	Compactación	% Eficiencia	% Eficiencia	% Eficiencia
10	Suelta	66,68%	67,06%	68,21%
10	Normal	56,47%	58,51%	60,38%
10	Denso	48,01%	49,76%	51,37%

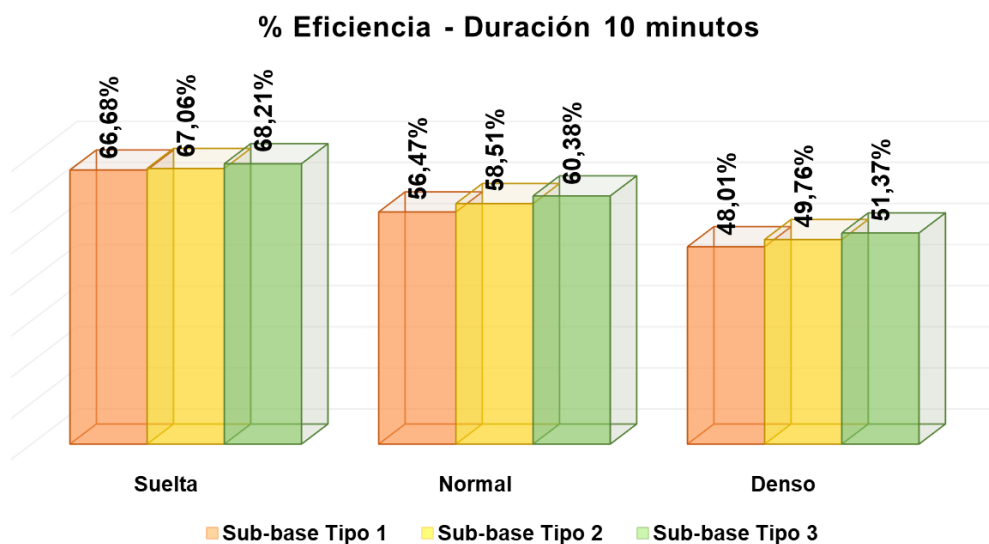
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 45 % Eficiencia Sub-base – 60 Minutos

		Sub-base tipo 1	Sub-base tipo 2	Sub-base tipo 3
Duración (min)	Compactación	% Eficiencia	% Eficiencia	% Eficiencia
60	Suelta	94,94%	94,97%	94,97%
60	Normal	94,88%	94,88%	94,91%
60	Denso	94,81%	94,84%	94,84%

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 18 % Eficiencia Drenante – Duración 10 Minutos

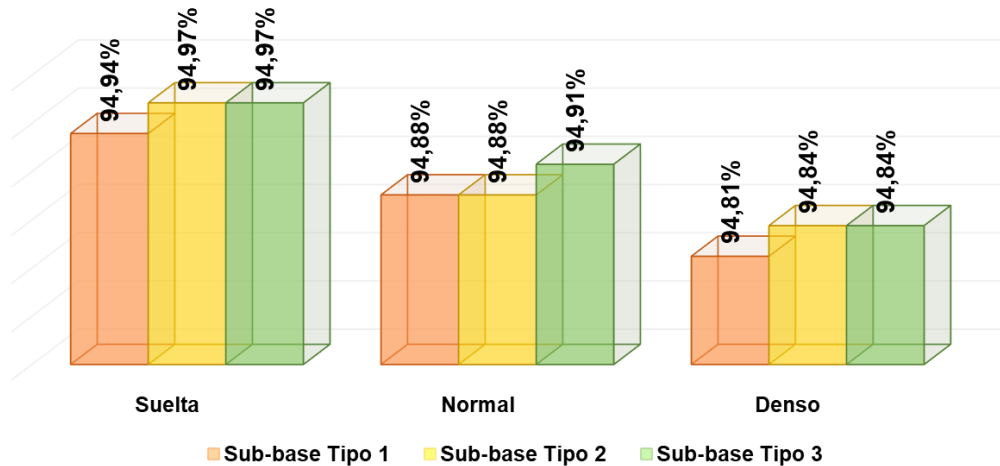


Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 19 % Eficiencia Drenante – Duración 60 minutos

% Eficiencia - Duración 60 minutos



Fuente: Elaboración Propia

En función de la compactación se identifican las diferentes eficiencias entre las sub-bases, donde se evidencia que la eficiencia drenante es más efectiva corresponde al tipo 3, sin embargo, no existe una diferencia significativa con relación al tipo de suelo.

Es preciso mencionar que la eficiencia drenante depende directamente de la energía de compactación, donde se identifica claramente que, para un tipo de suelo suelto, la eficiencia drenante es mayor respecto con la compactación normal y densa.

Al evaluar dos intensidades con diferente duración, se observa que, a menor duración, es decir, mayor caudal, el sistema presenta una relación proporcional de eficiencia, con lo cual se infiere que, el sistema es menos eficiente con una duración menor. Esta novedad, se entiende como la presencia de mayor volumen de escorrentía en la superficie.

Por otra parte, la duración de 60 minutos en el sistema, que hace referencia a un menor caudal en la superficie, los sistemas presentan una alta eficiencia para drenar el caudal de solicitud en la capa de rodadura.



También se puede evidenciar una tercera variable de caudal que hace referencia al caudal que se drena de la estructura de pavimento, que siempre es menor al que caudal recibido, debido a la condición que presenta el pavimento permeable de filtrar un mayor volumen de agua que será drenado de manera progresiva hacia los sistemas de almacenamiento.

Al observar el comportamiento filtrante de los sistemas propuestos se pudo observar una mayor eficiencia en el sistema que presenta tubería central con un mayor caudal infiltrado, con respecto a sistema de tubería lateral, como se puede observar en la Tabla 28 y la Tabla 30, lo que se podría dar por el recorrido que debe hacer el agua infiltrada hasta el sistema de recolección, ya que en el sistema de tubería lateral el agua que se filtra en el otro extremo del pavimento tiene un mayor recorrido para llegar al sistema de captación.

En cuanto al comportamiento del flujo se evidencia la dirección dependiendo de la ubicación de la tubería, para ello nos remitimos a la Ilustración 21 e Ilustración 23, en donde se ven los vectores de flujo que se dirigen de la capa de rodadura a través de una sección de las capas granulares hacia la tubería, lo que es consistente con la velocidad de infiltración que se presenta una velocidad mayor en la capa de adoquín que disminuye en las capas granulares. Teniendo una mayor velocidad de infiltración en el suelo suelto como se observa en la Tabla 29 y en la Tabla 31

El tiempo de infiltración necesario para drenar el caudal en mm^3/h de la superficie permite, para los sistemas presentados, unos desarrollos aceptables en términos de eficacia, ya que muestra un tiempo corto de evacuación de la intensidad total.

La investigación realiza un aporte cognitivo desde la parte técnica relacionada con el estudio del comportamiento de los suelos frente a exigencias drenantes que afectan la capa de rodadura, toda vez que, estas novedades o contingencias impactan a vida útil del pavimento. Así las cosas, el documento realiza una introducción que logra evaluar y profundizar las propiedades de una capa drenante con particularidades definidas en su construcción (compactación y gradación).



La evaluación de las propiedades hidráulicas de las capas granulares cobran una gran relevancia, dado que, la presencia de agua en la estructura de pavimento genera problemas de asentamientos a corto plazo y fallas en la capa de rodadura. No obstante, como es de conocimiento general, el diseño de pavimentos orienta su estudio en el comportamiento mecánico en función de las solicitudes de carga interpuestas.

Este informe pretende profundizar en el análisis de las propiedades hidráulicas con el fin tener cobertura que permita ampliar el campo de investigación para el drenaje de pavimentos permeables para promover la implementación de nuevas tecnologías de diseño y construcción a nivel nacional.

El trabajo presenta una evaluación de varias compactaciones en la capa para obtener las condiciones drenantes, y así, establecer los valores más favorables para lograr mayores rendimientos drenantes de la capa granular.

Por otra parte, se busca profundizar en las especificaciones granulométricas de pavimentos permeables bajo la normatividad colombiana, permitiendo así, evidenciar la efectividad de este tipo de material en el uso de este sistema.

Teniendo en cuenta las condiciones evaluadas en este trabajo, se recomienda que la implementación de este tipo de sistemas se oriente a zonas de bajo tráfico, tales como parqueaderos residenciales (no vehículos de grandes dimensiones), en vista que, no se contempla el comportamiento mecánico de la estructura, por ende, los requerimientos de carga no son significativos. Por el contrario, la propiedad de permeabilidad de las capas granulares aportaran un drenaje más eficiente y de menor tiempo.

Se considera preciso realizar una evaluación mecánica de los modelos presentados en el trabajo, con el fin de, ampliar el campo de acción e implementación de este tipo de pavimentos donde se requiera una mayor solicitud de carga.

12. CONCLUSIONES

La investigación y cálculos realizados se resumen en la Tabla 46, permiten observar que la eficiencia drenante de la sub-base, teniendo en cuenta la energía de compactación y conductividad hidráulica en cada tipo de material modelado, presenta una mayor eficiencia cuando el caudal o intensidad de lluvia tiene un mayor tiempo, de igual modo, se evidencia que dicha eficiencia, con relación a la compactación, es mayor cuando se tiene menor energía.

La relación entre compactación y el valor calculado de conductividad hidráulica, es inversamente proporcionales, puesto que, la sub-base con mayor compactación, presenta un valor de conductividad menor. De lo cual se logra inferir que, tanto el caudal de infiltración como la eficiencia drenante de la capa presentan comportamientos similares.

En cuanto a la calidad del material, se debe mencionar que las sub-bases presentan condiciones granulométricas diferentes. En la sub-base tipo 1, se contempla tamaños de tamices de Ø3/4" a No. 16. En la sub-base tipo 2, se establecen tamices entre Ø1" y No.16. Por último, la sub-base tipo 3, contempla una serie de 8 tamices que van de Ø1" ½ a No. 16. Como se puede observar, la granulometría tipo 3 presenta una mayor eficiencia drenante, lo que nos lleva a inferir que, el tamaño de las partículas y su angulosidad tendrían un comportamiento drenante directamente proporcional con su aumento o disminución.

Tabla 46 Resumen de resultados

Duración (min)	Compactación	Sub-base Tipo 1		Sub-base Tipo 2		Sub-base Tipo 3	
		Conductividad	% Eficiencia	Conductividad	% Eficiencia	Conductividad	% Eficiencia
10	Suelta	1,228,E-04	66.68%	1,277,E-04	67.06%	1,323,E-04	68.21%
10	Normal	1,045,E-04	56.47%	1,087,E-04	58.51%	1,126,E-04	60.38%
10	Denso	8,735,E-05	48.01%	9,088,E-05	49.76%	9,412,E-05	51.37%
60	Suelta	1,228,E-04	94.94%	1,277,E-04	94.97%	1,323,E-04	94.97%
60	Normal	1,045,E-04	94.88%	1,087,E-04	94.88%	1,126,E-04	94.91%
60	Denso	8,735,E-05	94.81%	9,088,E-05	94.84%	9,412,E-05	94.84%

Fuente: Elaboración Propia



Al observar el comportamiento drenante de los sistemas propuestos, se deduce que este valor es inversamente proporcional a la energía de compactación, ya que a menor compactación hay una mayor eficiencia, esto debido a que a mayor compactación menor es la cantidad de poros por los que fluye el agua infiltrada.

En cuanto a la problemática presentada de nivel de escorrentía en las superficies de pavimento, la eficiencia drenante que presentan los sistemas considerando las variables de compactación, tamaño y distribución de las partículas e intensidad de lluvia muestra que un sistema tiene eficiencia suficiente para la mitigar, la problemática drenando el agua suficiente en un tiempo determinado para evitar un alto nivel de agua de escorrentía en la superficie.

Se considera pertinente dentro del estudio técnico de diseño de capas de pavimento examinar las variables que involucra la presencia de un fluido en la capa de rodadura, no como novedad o contingencia que desfavorece el desempeño de la estructura, sino como oportunidad de evaluación de las propiedades hidráulicas que ofrezca la estructura, teniendo en cuenta la geometría de las partículas, procedimientos de compactación y variables alternas que sirven de insumo para conocer la respuesta de estos pavimentos y lo beneficios que se pueden obtener dentro de un diseño desde la perspectiva técnica de la hidráulica, sin dejar de lado, las características de cumplimiento de resistencia a solicitudes de servicio.

La estructura en estudio presenta cualidades polifacéticas relacionadas con el desempeño de funciones, no solo de resistencia de carga mínima (que no hace parte de esta investigación), sino, además contempla funciones de infiltración de escorrentía, lo que hace que estas construcciones sean sustentables en la vida útil de un pavimento, máxime si se trata de contrarrestar los efectos negativos que produce el agua sobre las estructuras de rodadura.



13. SUGERENCIAS

. Luego de la consulta técnica realizada de construcción de pavimentos permeables y de establecer el compendio referencial, académico e investigativo, se debe proceder con la ejecución de ensayos de laboratorio que permitan correlacionar con los datos expuestos para establecer nuevos conceptos comportamentales del pavimento y exponer nuevas ideas acerca de obtención de mejores eficiencias bajo los criterios normativos de diseño, que logren evidenciar un comportamiento a corto, mediano y largo plazo de la eficiencia del sistema en los procesos de infiltración de agua.

Adicionalmente y con el producto de los resultados de los laboratorios, se considera pertinente establecer un modelo a escala del comportamiento que permita soportar los cálculos realizados y el comparativo con la teoría.

Se considera pertinente valorar las condiciones de los pavimentos que ejerzan funciones adicionales a las evaluadas normalmente, como parte de un estudio adicional que logre identificar escenarios de condiciones críticas relacionadas con la presencia de agua en la superficie y de infiltración a lo largo de la estructura del pavimento. Lo anterior, con fines orientados a líneas de investigación y aplicación operativa de la Ingeniería Civil.

Promover el uso de herramientas ofimáticas de modelación de condiciones en pavimentos y taludes que permitan al profesional en formación, relacionarse con los procesos de modelación, requerimientos técnicos, manejo de unidades y dimensiones, además de, reflexionar y formular nuevos cuestionamientos acerca del comportamiento de los pavimentos bajo efectos condiciones críticas que se puedan desarrollar en campo.

Es pertinente relacionar la condición hidráulica dentro del diseño de un pavimento, para luego dar paso al diseño que cumpla con los estándares de resistencia a solicitudes de carga, lo cual, permite evaluar de forma general las propiedades de la estructura.

14. ANEXOS



15. BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Javier and O. Gamboa, “Influencia del agua en el desempeño de los pavimentos : lluvia ácida,” p. 17, 2017.
- [2] R. CASTELLANOS, “POR QUÉ SE INUNDA BOGOTÁ - Archivo Digital de Noticias de Colombia y el Mundo desde 1.990 - eltiempo.com,” *ELTIEMPO.COM*, 1994. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-97661> (accessed Oct. 26, 2020).
- [3] REDACCIÓN EL TIEMPO, “Inundado el deprimido de la calle 94 - Bogotá - ELTIEMPO.COM,” *ELTIEMPO.COM*, 2017.
- [4] “Pavimentos permeables. Una aproximación convergente en la construcción de vialidades urbanas y en la preservación del recurso agua - Dialnet.” <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6046445> (accessed Oct. 26, 2020).
- [5] Universidad Externado de Colombia Centro de Investigación sobre Dinámica Social, “Ciudad , espacio y población : el proceso de urbanización en Colombia.” Bogotá. Agosto 2007, p. 71, 2007.
- [6] S. D. de Ambiente and I. D. de G. de R. y C. C.- IDIGER, “PLAN DISTRITAL DE GESTIÓN DE RIESGOS Y CAMBIO CLIMÁTICO PARA BOGOTÁ D.C., 2015 – 2050,” no. Diciembre 2015. pp. 2015–2050, 2015.
- [7] I. D. de G. del R. y cambio climático IDIGER, “PROYECTO ACTUALIZACIÓN COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO PARA LA REVISIÓN ORDINARIA Y ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL.” p. 306, 2020.
- [8] IDEAM, “Estudio Nacional del Agua 2018 (ENA 2018),” *Marzo de 2019*. Bogotá, D.C., p. 438, 2019.
- [9] M. y E. A. IDEAM, Instituto de Hidrología, “SUBDIRECCIÓN DE HIDROLOGÍA Grupo de Modelación Actividades del Centro Nacional de Modelación.” p. 47, 2017.
- [10] El espectador, “Polémica por la recolección de agua lluvia en Bogotá • Canal Clima,” Sep. 2014. .
- [11] L. M. Espinosa Castro, “PAVIMENTOS PERMEABLES COMO ALTERNATIVA DE DRENAJE URBANO,” Bogotá, 2011.
- [12] G. B. Alliance, “Permeable Pavement,” 2016. <https://www.go->



gba.org/resources/green-building-methods/permeable-pavements/ (accessed Oct. 25, 2020).

- [13] P. P. P. & P. P. ~ Design, “PERMEABLE PAVEMENT,” 2020. <https://biologicperformance.com/permeable-pavement/> (accessed Oct. 25, 2020).
- [14] A. Hassani, S. Mohammad, and P. Ghoddusi, “Runoff infiltration through permeable block pavements,” *Proc. Inst. Civ. Eng. - Transp.*, vol. 163, no. 4, pp. 183–190, Dec. 2010, doi: 10.1680/tran.2010.163.4.183.
- [15] C. Salt and T. R. Kjeldsen, “Infiltration capacity of cracked pavements,” *Proc. Inst. Civ. Eng. Water Manag.*, vol. 172, no. 6, pp. 291–300, 2019, doi: 10.1680/jwama.18.00001.
- [16] M. Alsubih, G. Wright, S. Arthur, and D. Allen, “Influence of sediment on the hydrological performance of a permeable pavement,” *Proc. Inst. Civ. Eng. Water Manag.*, vol. 171, no. 2, pp. 67–75, 2018, doi: 10.1680/jwama.16.00113.
- [17] C. Dierkes, T. Lucke, and B. Helmreich, “General Technical Approvals for Decentralised Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)—The Current Situation in Germany,” *Sustainability*, vol. 7, no. 3, pp. 3031–3051, Mar. 2015, doi: 10.3390/su7033031.
- [18] CIRIA, *The SuDS Manual*. Londres 2015, 2015.
- [19] INTERPAVE - The Precast Concrete Paving & Kerb Association, *permeable pavements; Guide to the design. construction and maintenance of concrete block permeable pavements*, 6th ed., vol. 6, no. January. UK: Published by Interpave, 2010.
- [20] D. P. Quiroz Lasprilla and A. Trujillo López, “Pavimentos Porosos como sistema de Drenaje en Vías Urbanas,” Pontificia Universidad Javeriana, 2018.
- [21] S. A. HERNÁNDEZ and F. A. MACEA, “INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO DE SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ,” 2014.
- [22] I. N. de V.-S. de A. T. Ministerio de Transporte, “Manuel de Drenaje para Carreteras,” vol. 2058, no. 1. Bogotá, Colombia, p. 538, 2009.
- [23] A. Montejó Fonseca, *Ingeniería de pavimentos*. 2006.
- [24] X. A. SÁNCHEZ CASTILLO, “DISEÑO DE PAVIMENTOS ARTICULADOS PARA TRÁFICOS MEDIO Y ALTO,” 2003.



- [25] J. E. Villarraga R, K. L. Diaz T, and G. A. Martínez R, “Determinación de la conductividad hidráulica en muestras de arena con diferentes contenidos de óxido de hierro usando un permeámetro Ksat de última generación.”
- [26] lambe y Whitman, *Mecánica de suelos -Lambe y Whitman.pdf*. 2004.
- [27] INVIAS, “PERMEABILIDAD DE SUELOS GRANULARES (CABEZA CONSTANTE) INV E – 130 – 13,” pp. 1–12, 2014.
- [28] “INGENIERIA CIVIL: Ensayos en Laboratorio para Determinar la Conductividad Hidráulica.” <https://www.ingenierocivilinfo.com/2010/08/determinar-la-conductividad-hidraulica.html> (accessed Oct. 22, 2020).
- [29] “Infiltración del agua - Ciclo hidrológico (del agua).” .
- [30] B. Hernández Díaz, O. Martínez Llorente, and J. (Asesor) Mouthon Bello, “Diseño de un campo de prueba de pavimentos permeables en la ciudad de Cartagena,” *Universidad de Cartagena, Facultad de Ingeniería*, 2014. <https://repositorio.unicartagena.edu.co/handle/11227/1116> (accessed Sep. 27, 2020).
- [31] “Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible – SuD Sostenible,” 2016. .
- [32] D. Castro Fresno, J. Rodríguez Bayón, J. Rodríguez Hernández, F. Ballester Muñoz, and J. Rodríguez Hernández Francisco Ballester Muñoz, “PALABRAS CLAVE / BMPs / Desarrollo sostenible / Drenaje urbano / SUDS / SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS),” 2005.
- [33] K. D. T. JE Villarraga Rivera, “Programa de Ingeniería Civil Facultad de Ingeniería.” p. 6, 2018.
- [34] K. E. Saxton and W. J. Rawls, “Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions,” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 70, no. 5, pp. 1569–1578, 2006, doi: 10.2136/sssaj2005.0117.
- [35] H. Pati, “diccionario básico,” 2012.
- [36] O. Principal, P. Industrial, G. Sabana, V. Tibit, and C. O. O. Nacionales, “Concreto poroso o concreto permeable,” *Euclid Gr. Toxement*, no. 1, p. 7, 2017.
- [37] L. F. C. U. Yalill Felipe, “Diseño y aplicación de concreto poroso par pavimentos,” Pontificia Universidad Javeriana, 132AD.
- [38] F. Hoyos, “Geotecnia - Diccionario Básico,” p. 247, 2001.



- [39] Eduardo Frías Valero, “El Metodo De Los Elementos Finitos (Mef Ó Fem),” *Aportaciones Al Estud. Las Maquinas Electr. Flujo Axial Median. La Apl. Del Metod. Los Elem. Finitos*, pp. 111–144, 2004.
- [40] C. O. de Geólogos, “SLIDE la mejor aplicación de estabilidad de taludes - Tierra y Tecnología,” 2021. <https://www.icog.es/TyT/index.php/2016/10/slide-la-mejor-aplicacion-estabilidad-taludes/> (accessed May 17, 2021).
- [41] “Slide – Estabilidad de Taludes | MUCHIK - Ingenieria y geotecnia.” <http://muchik.com/slide-estabilidad-de-taludes/> (accessed May 17, 2021).
- [42] R. Medición, D. E. L. A. Infiltración, and E. N. El, “Medición De La Infiltración En El Suelo Mediante Infiltrómetros Doble Anillo,” *Gob. argentina*, p. 65.
- [43] I. N. de V. I. M. de Transporte, *Manual de Drenaje para carretera*, 2009th ed. Colombia, 2009.
- [44] Interpave, “Interpave – The Precast Concrete Paving Association.” <https://www.paving.org.uk/> (accessed Oct. 23, 2020).
- [45] T. Wang, L. Lin, and Y. Tsai, “Effect of Gravel Content on Saturated Hydraulic Conductivity in Sand,” *Geotech. Hazards from Large Earthquakes Heavy Rainfalls*, 2017, doi: 10.1007/978-4-431-56205-4.



16. RELACIÓN DE FIRMAS

EMILY NATALY ARIZA GARZÓN – 507429

Estudiante Ingeniería Civil

ORLANDO VELANDIA RISCANEVO – 507135

Estudiante Ingeniería Civil

Aprobó: Ing. Cristhian Alexander Rosales Rodríguez - Ing. C. MSc.
Revisó: Ing. Cristhian Alexander Rosales Rodríguez - Ing. C. MSc.
Elaboró: Emily Nataly Ariza Garzón – Estudiante Ingeniería Civil
Elaboró: Orlando Velandia Riscanevo – Estudiante Ingeniería Civil